

สัญญาเลขที่ RDG5740028

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การพัฒนาสื่อการเรียนการสอนพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล”

Development of Educational Tools for Teaching and Learning the
Fundamentals of Digital Communications

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|--------------------------------|--------------------|
| 1. ดร.ปกรณ์ ยุบลโกศล | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| 2. รศ.ดร.ณัฐภพ นิยมปิตีวัน | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| 3. รศ.ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |

มิถุนายน พ.ศ. 2559

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

โครงการวิจัยนี้มุ่งหวังที่จะลดการขาดแคลนชุดทดลองส่งข้อมูลสำหรับวิชาการสื่อสารแบบดิจิทัล ซึ่งจัดเป็นวิชาพื้นฐานที่สำคัญในปัจจุบัน เนื่องจากเทคโนโลยีการสื่อสารแบบดิจิทัลนั้น เป็นเทคโนโลยีที่รองรับกิจกรรมแทบทุกประเภทในชีวิตประจำวัน เช่น การสนทนาผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ การสื่อสารด้วยอีเมล การสื่อสารผ่านสื่อสังคมออนไลน์ (social media) การดูโทรทัศน์ดิจิทัล เป็นต้น เนื่องจากยังไม่มีผู้ผลิตชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลในประเทศไทย และการนำเข้าชุดทดลองสำเร็จรูปจากต่างประเทศมีราคาสูงมาก วัตถุประสงค์หลักของโครงการนี้คือการพัฒนาชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลขึ้นเองภายในประเทศ ควบคู่ไปกับการพัฒนา กิจกรรมการเรียนรู้สำหรับ 1 ภาคเรียน (16 สัปดาห์) สำหรับวิชาที่เกี่ยวข้องกับพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล ในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) ขึ้นไป

การพัฒนาชุดทดลองใช้แนวทางของระบบที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (software defined) ซึ่งระบบการสื่อสารแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์นี้ สามารถใช้ฮาร์ดแวร์ชุดเดียวกันทำหน้าที่ที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลอง โดยนักศึกษาสามารถต่อชุดทดลองเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB และใช้โปรแกรม (ซอฟต์แวร์) ในเครื่องคอมพิวเตอร์กำหนดหน้าที่ของฮาร์ดแวร์ก่อนจะเริ่มทำการทดลอง เนื่องจากทีมงานได้พัฒนาโปรแกรมเหล่านี้ขึ้นเอง การใช้ชุดทดลองจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยซอฟต์แวร์อื่น ๆ ที่มีค่าลิขสิทธิ์

ทีมงานได้นำชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นไปใช้จริงในภาคปลายของปีการศึกษา พ.ศ. 2557 โดยประสานงานกับอาจารย์ในวิทยาลัยอาชีวศึกษา 3 แห่งในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ได้แก่ วิทยาลัยเทคนิคกาญจนาภิเษกมหานคร วิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ และวิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี จากผลการสอบวัดระดับความรู้ของนักศึกษาก่อนและหลังการใช้ชุดทดลองในสถาบัน 2 แห่ง ทีมงานพบว่าการใช้ชุดทดลองช่วยให้คะแนนสอบวัดระดับความรู้ดีขึ้น และจากความเห็นของอาจารย์ผู้สอน พบว่าชุดทดลองสามารถเพิ่มความสนใจและความกระตือรือร้นในการเรียนรู้ขั้นตอนต่าง ๆ ของการสื่อสารแบบดิจิทัลได้เป็นอย่างดี และนักศึกษาอยากที่จะได้ทำการทดลองประเภทนี้อีกในอนาคต

ควบคู่ไปกับการพัฒนาชุดทดลอง ทีมงานยังได้พัฒนาโปรแกรมจำลองผลการทดลองเพื่อให้นักศึกษาที่สนใจแต่ไม่มีโอกาสได้ใช้ชุดทดลองจริง สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเองตามอัธยาศัยจากโปรแกรมนี้ นักศึกษาสามารถเรียกใช้โปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นผ่านโปรแกรมเบราว์เซอร์ (browser) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป เช่น Internet Explorer และ Google Chrome โดยการใช้งานนั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับระบบปฏิบัติการ (operating system) และยังสามารถเรียกใช้โปรแกรมผ่านอุปกรณ์แบบพกพา เช่น tablet PC และ smart phone ได้อีกด้วย

บทคัดย่อ

เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์การทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โครงการวิจัยนี้ได้พัฒนาสื่อการเรียนรู้ขึ้นเองภายในประเทศ ควบคู่ไปกับกิจกรรมการเรียนรู้สำหรับ 1 ภาคเรียน (16 สัปดาห์) เพื่อใช้สนับสนุนการเรียนการสอนวิชาที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารแบบดิจิทัล การพัฒนาชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) ใช้แนวทางของระบบที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (software defined) โดยใช้ฮาร์ดแวร์ชุดเดียวกันทำหน้าที่ที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลอง โดยนักศึกษาสามารถต่อชุดทดลองเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB และใช้โปรแกรมในเครื่องคอมพิวเตอร์กำหนดหน้าที่ของฮาร์ดแวร์ก่อนจะเริ่มทำการทดลอง ทีมงานได้นำชุดทดลองไปใช้จริงในภาคปลายของปีการศึกษา พ.ศ. 2557 ที่วิทยาลัยอาชีวศึกษา 3 แห่ง จากผลการสอบวัดระดับความรู้ของนักศึกษาก่อนและหลังการใช้ชุดทดลอง พบว่าการใช้ชุดทดลองช่วยให้คะแนนสอบวัดระดับความรู้ดีขึ้น และช่วยเพิ่มความสนใจและความกระตือรือร้นในการเรียนได้เป็นอย่างดี ทีมงานยังได้พัฒนาโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) เพื่อให้นักศึกษาที่ไม่มีโอกาสได้ใช้ชุดทดลองจริง สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเองผ่านโปรแกรมเบราว์เซอร์ (browser) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป และยังสามารถใช้โปรแกรมบนอุปกรณ์แบบพกพา เช่น tablet PC และ smart phone ได้อีกด้วย

Abstract

To help reduce the shortage of lab equipment for digital transmissions, this research project developed educational tools together with learning activities for one semester (16 weeks) to support a subject related to digital communications. The hardware-based lab kit was developed based on the software defined approach, which enables the use of a common set of hardware to function differently for different labs. A student can connect the lab kit to a PC through a USB cable, and then use a program on the PC to configure the hardware before each experiment. The lab kit was used on a trial basis in three vocational colleges. Pre-test and post-test scores on the basic knowledge of digital communications indicate that using the lab kit can help increase the test score. In addition, college instructors observed that the lab kit made students more interested and enthusiastic in the subject. In addition, a web-based simulation program was developed to give students opportunities to learn despite having no access to the lab kit. This program can be run on any common web browser, and can even be run on a tablet PC or a smart phone.

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
Executive Summary	ก
บทคัดย่อ (Abstract)	ข
สารบัญ	ค
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สมมุติฐานการวิจัย	2
1.3 วัตถุประสงค์ในการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
1.5 กรอบแนวคิดในการวิจัย	4
1.6 นิยามศัพท์	6
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	7
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ความเป็นมาและการพัฒนาการ	8
2.2 ระบบสื่อสารแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์	9
2.3 โปรแกรมจำลองผลการทดลองส่งบิตข้อมูล	10
2.4 ชุดทดลองแบบสำเร็จรูปที่มีอยู่ในท้องตลาด	11
3 วิธีดำเนินการวิจัย	13
3.1 การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับความต้องการสื่อสารการเรียนรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล	13
3.2 การกำหนดประชากร และกลุ่มตัวอย่างผู้ให้ข้อมูล	13
3.3 การกำหนดเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล	14
3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูลในการวิจัย	14
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้	14
3.6 การจัดทำสื่อการเรียนรู้พร้อมทั้งคู่มือ	14
3.7 การนำสื่อให้อาจารย์ผู้สอนได้ทดลองใช้	17
3.8 การประเมินความเหมาะสมของสื่อการเรียนรู้	19
3.9 การกำกับติดตามการใช้สื่อการเรียนรู้	19

3.10 การประเมินผลการใช้สื่อการเรียนรู้	20
3.11 การได้สื่อการเรียนรู้และคู่มือฉบับสมบูรณ์	20
4 ผลการวิจัย	21
4.1 ผลการศึกษาวเคราะห์และสิ่งเคราะห์เพื่อพัฒนาสื่อการเรียนรู้	21
4.2 ผลการสร้างงานวิจัยจากวัตถุประสงค์	22
4.3 ผลการประเมินโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์)	47
4.4 ผลการประเมินชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์)	50
4.5 ผลจากการทดลองใช้ชุดทดลอง	55
4.6 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา	58
5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	60
5.1 สรุปผลการวิจัย	60
5.2 อภิปรายผล	62
5.3 ข้อเสนอแนะ	63
ภาคผนวก	65
เอกสารอ้างอิง	68
เอกสารแนบ	70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเทคโนโลยีการสื่อสารได้ทำให้ลักษณะการประกอบอาชีพเปลี่ยนแปลงไป โดยในปัจจุบันองค์กรส่วนใหญ่นำเทคโนโลยีการสื่อสารมาช่วยให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่เดิมการสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์ จะเกี่ยวข้องกับการสนทนาทางโทรศัพท์ (voice traffic) เป็นหลัก แต่ในปัจจุบันจะเป็นการส่งข้อมูล (data traffic) มากกว่าการสนทนาทางโทรศัพท์ [1] ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นข้อความ เสียง หรือภาพ จะถูกส่งในรูปแบบของบิตข้อมูลด้วยเทคนิคการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล การสื่อสารแบบดิจิทัล (digital communications) จึงจัดเป็นเทคโนโลยีพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาประเทศ (นอกเหนือจากชื่อโครงการและโครงการย่อย ซึ่งใช้คำว่า “ดิจิทัล” ตามเอกสารสัญญาโครงการ ในส่วนอื่น ๆ รายงานฉบับนี้จะใช้คำว่า “ดิจิทัล” ตามราชบัณฑิตยสถาน)

สำหรับบัณฑิตในสาขาที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์ ความเข้าใจพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัลอย่างชัดเจนจะช่วยให้ปฏิบัติงานได้อย่างมั่นใจ มีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งยังสามารถเรียนรู้ด้วยตนเอง (self learning) ในระดับหนึ่งเกี่ยวกับมาตรฐานระบบการสื่อสารในอนาคต อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าเสียดายว่า ในหลายสถาบันการศึกษา วิชาที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารแบบดิจิทัลยังอาศัยการเรียนรู้ทางทฤษฎีโดยใช้ตำราเป็นหลัก [2] ซึ่งทำให้นักศึกษาที่ไม่นัดในการเรียนรู้เชิงนามธรรม (abstract) ขาดความมั่นใจในความรู้ที่ตนเองมีอยู่และมองการสื่อสารแบบดิจิทัลเป็นสิ่งลึกลับ ซับซ้อน ยากที่จะเข้าใจ

เหตุผลหนึ่งของการใช้ทฤษฎีเป็นเครื่องมือหลักในการเรียนการสอนวิชาที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารแบบดิจิทัล คือ ชุดทดลอง (laboratory kit) ส่งข้อมูลแบบดิจิทัลนั้นมีราคาสูง โดยชุดทดลองสำเร็จรูปสำหรับกิจกรรมการทดลอง 1 ภาคเรียน มักจะมีราคาสูงกว่า 200,000 บาทขึ้นไปต่อชุด [3, 4] ทำให้สถาบันการศึกษาส่วนมากไม่สามารถจัดหาชุดทดลองในปริมาณที่เหมาะสมกับจำนวนนักศึกษา เช่นมีชุดทดลองเพียง 2-3 ชุดสำหรับนักศึกษาประมาณ 50 คน ต้องอาศัยการทำการทดลองเป็นกลุ่ม และบางการทดลองเป็นเพียงการดูอาจารย์ผู้สอนสาธิต

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาสื่อการเรียนรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล โดยใช้กิจกรรมการทดลองเป็นเครื่องมือในการเรียนรู้ เพื่อเสริมการเรียนรู้จากตำรา และชุดทดลองที่ใช้สามารถสร้างขึ้นเองภายในประเทศด้วยราคาต้นทุนที่ไม่สูงนัก เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์การทดลองดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

ในประเทศกำลังพัฒนาบางประเทศ เช่นประเทศอินเดีย ได้มีการพัฒนาชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลภายในประเทศ [5] อย่างไรก็ตาม การสร้างอุปกรณ์ดังกล่าวยังอาศัยวงจรแบบแอนะล็อกเป็นหลัก มีการใช้อุปกรณ์ประมวลผลแบบดิจิทัลเพียงเล็กน้อย ทำให้ต้องใช้ปริมาณฮาร์ดแวร์มากสำหรับการทดลองหลาย ๆ การทดลองในหนึ่งภาคเรียน ส่วนในประเทศไทย ถึงแม้ว่าจะมีผู้ผลิตชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลอยู่บ้าง [6, 7] แต่ชุดทดลองเหล่านี้ยังไม่นับเป็นระบบสื่อสารโดยสมบูรณ์ เช่นมีการสร้างสัญญาณข้อมูลจากตัวส่ง แต่ยังไม่มีการแสดงขั้นตอนการรับข้อมูลที่ตัวรับ โดยรวมแล้ว ในปัจจุบันยังไม่มีผู้ประกอบการไทยรายใดผลิตชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลขึ้นเองโดย

สมบูรณ์และจำหน่ายให้แก่สถานศึกษาในราคาที่ไม่สูงนัก

สื่อการเรียนรู้ที่ถูกพัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ประเภทแรกเป็นโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) ส่งข้อมูลแบบดิจิทัล ซึ่งอนุญาตให้นักศึกษาได้ทำการทดลองผ่านโปรแกรมเบราว์เซอร์ (browser) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป เช่น Internet Explorer และ Google Chrome โดยการใช้งานนั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับระบบปฏิบัติการ (operating system) และยังสามารถเรียกใช้โปรแกรมผ่านอุปกรณ์แบบพกพา เช่น tablet PC และ smart phone ได้อีกด้วย โปรแกรมจำลองผลการทดลองนี้จะอนุญาตให้นักศึกษาได้เห็นภาพสัญญาณข้อมูลแบบต่าง ๆ เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจที่ชัดเจนขึ้นกว่าจากการอ่านตำราเท่านั้น

ถึงแม้ว่าการจำลองผลการทดลอง จะสามารถทำได้โดยให้นักศึกษาเขียนโปรแกรมด้วยภาษาของซอฟต์แวร์คำนวณทางคณิตศาสตร์ เช่น MATLAB [8] แต่ในแนวทางดังกล่าว มีบ่อยครั้งที่นักศึกษาจดจ่ออยู่กับการเขียนโปรแกรมให้ไม่มีข้อผิดพลาด แทนการทำความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับเนื้อหาวิชาที่กำลังศึกษาอยู่ ดังนั้น โปรแกรมจำลองผลการทดลองที่ใช้งานง่าย จะมีประโยชน์ในการเสริมความเข้าใจพื้นฐานของการสื่อสารแบบดิจิทัล

ประเภทที่สองของสื่อการเรียนรู้ เป็นการชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (ฮาร์ดแวร์) ซึ่งจะอนุญาตให้นักศึกษาได้ทดลองส่งสัญญาณข้อมูลจริงผ่านสายส่งจากตัวส่งไปยังตัวรับ โดยนักศึกษาสามารถเห็นสัญญาณข้อมูลได้ผ่านอุปกรณ์ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ซึ่งแสดงสัญญาณผ่านทางหน้าจอของอุปกรณ์เองหรือทางหน้าจอของเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยสาย USB ชุดทดลองประเภทฮาร์ดแวร์นี้จะเพิ่มความเข้าใจและความมั่นใจในองค์ความรู้ของนักศึกษา เนื่องจากการได้เห็นการนำความรู้ไปใช้ส่งข้อมูลในระบบจริงที่จับต้องได้

การขาดองค์ความรู้ที่เข้มแข็งในพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล ทำให้ประเทศไทยยังไม่สามารถพัฒนาตนเองเป็นผู้ผลิตเทคโนโลยีทางการสื่อสารได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังเช่นประเทศเกาหลีใต้ ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะมีรายได้จากการเก็บ 3.75% ของรายได้รวมต่อปีจากผู้ประกอบการธุรกิจการให้บริการโทรคมนาคม ซึ่งรายได้ส่วนนี้ได้สะสมมาจนถึงระดับหมื่นล้านบาทก็ตาม [9] นอกเหนือจากการลดการขาดแคลนของอุปกรณ์การทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โครงการนี้จะผลักดันให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์สื่อสารแบบดิจิทัลขึ้นเองในประเทศ เพื่อกระตุ้นให้เกิดนวัตกรรมสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารแบบดิจิทัลในปริมาณมากขึ้นในประเทศไทย

1.2 สมมุติฐานการวิจัย

การได้ทำการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โดยเห็นสัญญาณข้อมูลรูปแบบต่าง ๆ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล เมื่อเทียบกับการเรียนรู้จากตำราหรือจากห้องเรียนโดยไม่มีการทดลอง

1.3 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

โครงการวิจัยมีวัตถุประสงค์หลักดังต่อไปนี้

1. เพื่อออกแบบการทดลองและสร้างโปรแกรมจำลองผลการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (ซอฟต์แวร์) โดยครอบคลุมถึงวิธีการส่งข้อมูลพื้นฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

2. เพื่อพัฒนาชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (ฮาร์ดแวร์) ในสภาพแวดล้อมจริง ด้วยราคาต้นทุนที่ไม่สูงนักเมื่อเทียบกับการสั่งซื้อจากต่างประเทศ โดยมีราคาต้นทุนต่อชุดไม่เกิน 20,000 บาท (ไม่รวมเครื่องคอมพิวเตอร์)
3. เพื่อทดลองใช้ชุดทดลองในการเรียนการสอนจริง โดยประสานงานกับวิทยาลัยอาชีวศึกษา

จากวัตถุประสงค์หลักดังกล่าว โครงการนี้ได้แบ่งกิจกรรมออกเป็น 3 โครงการย่อยดังต่อไปนี้

1. ชื่อโครงการย่อย: การออกแบบและสร้างโปรแกรมจำลองการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล
Design and Simulation of Laboratory Experiments on Digital Transmissions
หัวหน้าโครงการย่อย: ดร.ปกรณ์ ยุบลโกศล มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
2. ชื่อโครงการย่อย: การพัฒนาอุปกรณ์ชุดทดลองการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล
Development of Hardware for Digital Transmission Laboratory Kits
หัวหน้าโครงการย่อย: รศ.ดร.ณัฐภ นิมปิวัน มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
3. ชื่อโครงการย่อย: การประยุกต์ใช้ชุดทดลองในการเรียนการสอนพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล
Application of Laboratory Kits in Teaching the Basics of Digital Communications
หัวหน้าโครงการย่อย: รศ.ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา

โครงการนี้มุ่งสร้างสื่อการเรียนรู้เพื่อเสริมในส่วนของกิจกรรมการทดลอง ไม่ได้ตั้งเป้าเพื่อผลิตตำราเรียนวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัลมาชดเชยตำราที่มีอยู่ อย่างไรก็ตาม โครงการได้จัดทำคู่มือกิจกรรมการเรียนรู้จำนวน 1 ภาคเรียน ซึ่งรวมถึงการทบทวนความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้อง แบบฝึกหัด คำอธิบายการทดลอง และใบงานกิจกรรม โดยอาจารย์ผู้สอนสามารถนำไปใช้ได้ตามความต้องการในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) ขึ้นไป

1.4.2 ขอบเขตด้านเก็บรวบรวมข้อมูล

การประเมินคุณภาพของโปรแกรมจำลองผลการทดลองและชุดทดลอง อาศัยการจัดอบรมเชิงปฏิบัติการจำนวน 2-3 ครั้ง ให้ผู้เข้าอบรมได้ลองใช้โปรแกรมและชุดทดลองแล้วตอบแบบสอบถาม นอกจากนี้ ทีมงานได้เรียนเชิญผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน ซึ่งมีประสบการณ์สอนและทำวิจัยในสาขาการสื่อสารแบบดิจิทัล ให้ได้ลองใช้โปรแกรมและชุดทดลองแล้วสอบถามความคิดเห็นพร้อมข้อเสนอแนะ

การนำชุดทดลองไปใช้จริง ได้ประสานงานกับวิทยาลัยอาชีวศึกษา 3 แห่ง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวิทยาลัยแห่งหนึ่งยังไม่มีอาจารย์ผู้สอนในสาขานี้โดยตรง จึงได้ทดลองใช้พร้อมเก็บข้อมูลคะแนนสอบวัดความรู้ก่อนและหลังการนำไปใช้จากวิทยาลัยเพียง 2 แห่ง ส่วนวิทยาลัยแห่งสุดท้ายได้ทำการทดลองเพียงบางส่วนเท่านั้นเพื่อให้ประสบการณ์แก่นักศึกษา แต่ไม่ได้เก็บข้อมูลคะแนนสอบ

1.4.3 ขอบเขตด้านเวลาการศึกษาวิจัย

โครงการเริ่มวันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2557 และสิ้นสุดวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2558 (โดยมีการขยายระยะเวลาจากเดิมสิ้นสุดวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558) รวมระยะเวลาทำวิจัยทั้งสิ้น 15 เดือน การนำชุดทดลองไปใช้จริง ดำเนินการในช่วงภาคปลายของปีการศึกษา พ.ศ. 2557 ตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2557 จนถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2558 การจัดอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อเผยแพร่สื่อการเรียนรู้ที่ถูกพัฒนาขึ้น ดำเนินการตั้งแต่เดือนมิถุนายนจนถึงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2558 การประเมินสื่อการเรียนรู้โดยผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน ดำเนินการในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2558

1.5 กรอบแนวคิดในการวิจัย

การเรียนรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีนั้น ทำได้ทั้งในเชิงทฤษฎีและในเชิงปฏิบัติ ในปัจจุบันการเรียนรู้โดยการทำกิจกรรมในคาบเรียน จัดว่าเป็นสิ่งสำคัญไม่แพ้การฟังบรรยายจากอาจารย์ผู้สอน จนกระทั่งอาจารย์ผู้สอนบางคนใช้เวลาส่วนใหญ่ในคาบเรียนสำหรับการทำแบบฝึกหัดหรือการทดลอง ส่วนการฟังบรรยายนั้น ให้นักศึกษาดูจากฐานข้อมูลวิดีโอก่อนเข้าคาบเรียน แนวคิดของการใช้คาบเรียนในการทำกิจกรรมเป็นหลัก เรียกกันว่าการเรียนการสอนแบบ flip teaching หรือ flip classroom ซึ่งจัดเป็นแนวทางการเรียนรู้ในศตวรรษใหม่ที่ถือว่าใช้ได้ผลดีกับการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [10]

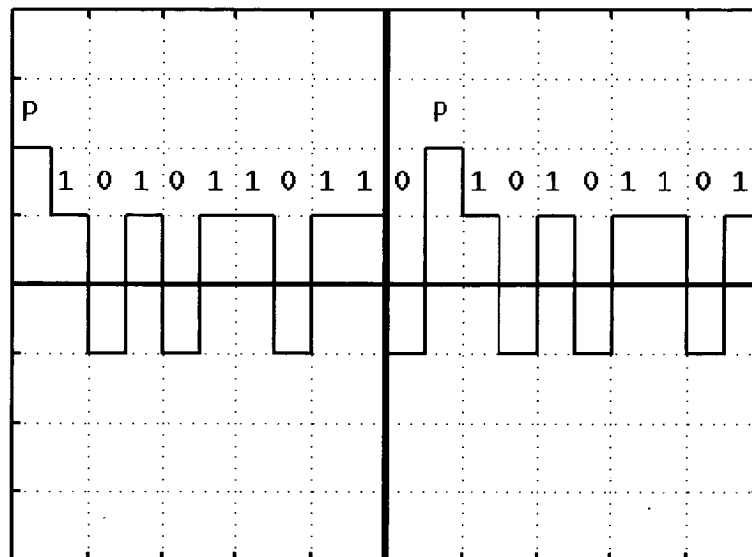
โครงการวิจัยนี้มุ่งพัฒนาสื่อการเรียนรู้เพื่อเสริมแนวทางการเรียนรู้ดังกล่าว โดยหัวข้อวิชาเป้าหมายคือ พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล สื่อการเรียนรู้ประกอบไปด้วย

1. คู่มือการทดลองซึ่งมีกิจกรรมการเรียนรู้สำหรับ 1 ภาคเรียน
2. โปรแกรมสำหรับจำลองผลการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (ซอฟต์แวร์) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสำหรับสาธิตการส่งข้อมูล โดยใช้คลื่นเสียงผ่านลำโพงของเครื่องคอมพิวเตอร์
3. ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (ฮาร์ดแวร์) ด้วยอุปกรณ์จริง โดยใช้อุปกรณ์เอฟพีจีเอ (field programmable gate array: FPGA) เป็นอุปกรณ์หลักในการพัฒนา

การเขียนโปรแกรมจำลองผลระบบส่งข้อมูลแบบดิจิทัลนั้น มีคำอธิบายอยู่ในตำราหลายเล่ม [11, 12] อย่างไรก็ตาม ในแนวทางดังกล่าว มีบ่อยครั้งที่นักศึกษาจดจ่ออยู่กับการเขียนโปรแกรมให้ไม่มีข้อผิดพลาด แทนการทำความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับเนื้อหาวิชาที่กำลังศึกษาอยู่ ดังนั้น โปรแกรมจำลองผลการทดลองที่ใช้งานง่าย จะมีประโยชน์ในการเสริมความเข้าใจพื้นฐานของวิชาการสื่อสารแบบดิจิทัล

สำหรับการพัฒนาโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) ในโครงการวิจัยนี้ นอกเหนือจากจะทำให้นักศึกษาใช้งานได้ง่าย จะมุ่งเน้นให้เกิดกิจกรรมเชิงปฏิสัมพันธ์ (interactive) เช่นการอนุญาตให้นักศึกษาได้เปลี่ยนบิตข้อมูลที่ถูกส่ง และเห็นผลกระทบต่อสัญญาณข้อมูลแบบทันทีทันใด โดยกิจกรรมในลักษณะนี้จะช่วยดึงดูดความสนใจของนักศึกษา ให้ได้มีส่วนร่วม แทนที่จะเป็นเพียงผู้สังเกตการณ์เท่านั้น รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างสัญญาณข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมจำลองผลการทดลอง โดยแต่ละบิตข้อมูลแสดงด้วยค่าสูง (บิต 1) และค่าต่ำ (บิต 0) ของสัญญาณ ส่วนค่าสูง

พิเศษ (แทนด้วยอักษร P ย่อมาจาก “preamble”) หมายถึงส่วนหัวของแต่ละกลุ่มบิตข้อมูล (กลุ่มละ 10 บิต)

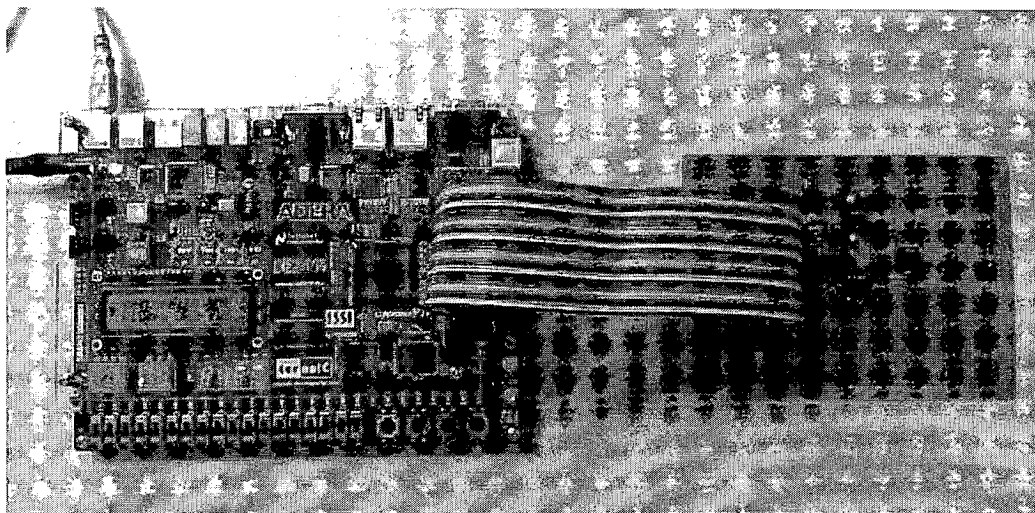


รูปที่ 1.1: ตัวอย่างสัญญาณข้อมูลจากโปรแกรมจำลองผลการทดลอง

สำหรับชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (ฮาร์ดแวร์) โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ทำการประมวลสัญญาณ (signal processing) ทั้งแบบแอนะล็อก (analog) และแบบดิจิทัล (digital) การพัฒนาชุดทดลองทำได้หลายแนวทาง ขึ้นอยู่กับว่าเราจะกำหนดให้การประมวลสัญญาณในขั้นตอนใดเป็นแบบแอนะล็อก และในขั้นตอนใดเป็นแบบดิจิทัล [13]

ในปัจจุบัน เราสามารถประมวลสัญญาณแบบดิจิทัลได้โดยการเขียนโปรแกรมกำหนดหน้าที่ (ซึ่งเปรียบเสมือนการสร้างวงจรดิจิทัล) ของอุปกรณ์เอฟพีจีเอ ซึ่งมีความสามารถในการประมวลผลเร็วถึงระดับ 10–100 เมกะเฮิรตซ์ [14, 15] ข้อได้เปรียบหนึ่งของเอฟพีจีเอ คือสามารถทำหน้าที่ประมวลสัญญาณหลายแบบด้วยอุปกรณ์ชิ้นเดียวกัน โดยขึ้นอยู่กับโปรแกรมกำหนดหน้าที่ เปรียบเสมือนกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่สามารถทำหน้าที่ได้หลายอย่างตามโปรแกรมประยุกต์ที่ถูกเรียกใช้งาน สำหรับชุดทดลองที่จะแสดงการส่งข้อมูลหลายวิธี การประมวลสัญญาณแบบดิจิทัลบนเอฟพีจีเอจะสะดวกกว่าการประมวลสัญญาณแบบแอนะล็อกเป็นหลัก เนื่องจากเราสามารถใช้อุปกรณ์ชิ้นเดียวรองรับการส่งข้อมูลหลายวิธีในหลายการทดลอง

แนวทางการสร้างระบบสื่อสารแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (software defined) นั้นเป็นความพยายามที่จะประมวลสัญญาณแบบดิจิทัลให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใช้วงจรไฟฟ้าแบบแอนะล็อกเท่าที่จำเป็นจริง ๆ เท่านั้น [13] เพื่อให้ชุดทดลองที่พัฒนา สะดวกต่อการใช้งาน และไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เสริมมากนักนอกเหนือจากอุปกรณ์เอฟพีจีเอเพียงชิ้นเดียวสำหรับตัวรับหรือตัวส่ง โครงการนี้จึงใช้แนวทางการสร้างระบบสื่อสารแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ ใช้เอฟพีจีเอเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในการพัฒนาชุดทดลอง จากนั้นพัฒนางจรไฟฟ้าแบบแอนะล็อกเท่าที่จำเป็นต่อการทำงานของระบบโดยรวม รูปที่ 1.2 แสดงเอฟพีจีเอที่เชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้าแบบแอนะล็อก ซึ่งจัดเป็นต้นแบบของการพัฒนาชุดทดลองประเภทฮาร์ดแวร์ในโครงการวิจัยนี้



รูปที่ 1.2: ต้นแบบอุปกรณ์ตัวส่งซึ่งประกอบไปด้วยเอฟพีจีเอ (ซ้ายมือ) และวงจรไฟฟ้าแบบแอนะล็อก (ขวามือ)

เช่นเดียวกับการพัฒนาโปรแกรม (ซอฟต์แวร์) การพัฒนาชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) จะเน้นให้นักศึกษาสามารถเปลี่ยนบิตข้อมูลที่ถูกส่งได้ด้วยตนเอง และเห็นผลกระทบต่อสัญญาณข้อมูลแบบทันทีทันใด โดยการรองรับกิจกรรมเชิงปฏิสัมพันธ์ในลักษณะนี้ จัดเป็นจุดเด่นของชุดทดลองที่โครงการนี้พัฒนาขึ้น

1.6 นิยามศัพท์

- “บิตข้อมูล” หมายถึง หน่วยของข้อมูลที่อยู่ในรูปของเลขฐานสอง มีค่าที่เป็นไปได้เพียงสองค่าคือ 0 และ 1
- “การสื่อสารแบบดิจิทัล” หรือ “การส่งข้อมูลแบบดิจิทัล” หมายถึง การส่งข้อมูลที่ถูกแปลงให้อยู่ในรูปของบิต เช่นตัวอักษร “A” ที่ถูกแปลงเป็น 8 บิต ได้แก่ “01000001” ตามการเข้ารหัสแอสกี (ASCII) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย
- “ตัวส่ง” หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้ส่งบิตข้อมูลในระบบสื่อสารแบบดิจิทัล
- “ตัวรับ” หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้รับบิตข้อมูลในระบบสื่อสารแบบดิจิทัล
- “สัญญาณข้อมูล” หมายถึง สัญญาณไฟฟ้าที่สามารถนำบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับ โดยตัวส่งจะต้องทำการแปลงบิตข้อมูลเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปมีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt หรือ V) ในทางกลับกัน ตัวรับจะต้องแปลงสัญญาณไฟฟ้ากลับเป็นบิตข้อมูล
- “สื่อกายภาพ” หมายถึง สื่อสารที่เชื่อมต่อระหว่างตัวส่งและตัวรับ ในโครงการวิจัยนี้จะเป็นสายโคแอก (coaxial cable) ซึ่งทำด้วยทองแดง
- “โปรแกรมจำลองผลการทดลอง” หมายถึง โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ซอฟต์แวร์) ที่แสดงตัวแปรต้น (เช่นบิตข้อมูล) และตัวแปรตาม (เช่นสัญญาณข้อมูลที่ตัวส่ง และที่ตัวรับ) โดยอนุญาตให้ผู้ใช้งานกำหนดตัวแปรต้นได้ และสังเกตผลกระทบต่อตัวแปรตาม

- “ชุดทดลอง” หมายถึง อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้สำหรับการทดลอง โดยอนุญาตให้ผู้ใช้งานกำหนดตัวแปรต้น (เช่น บิตข้อมูล) และสังเกตผลกระทบต่อตัวแปรตาม (รูปร่างสัญญาณข้อมูลที่ตัวส่ง และที่ตัวรับ)
- “กิจกรรมการเรียนรู้” หมายถึง กิจกรรมที่จัดขึ้นเพื่อส่งเสริมความเข้าใจในประเด็นใดประเด็นหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นการทำแบบฝึกหัด หรือการทำการทดลอง หรือทั้งสองอย่างก็ได้

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ผลผลิตของโครงการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ดังต่อไปนี้

1. สื่อการเรียนรู้ที่ถูกพัฒนาขึ้น จะช่วยพัฒนาคุณภาพการเรียนการสอนวิชาที่เกี่ยวข้องกับพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล ทำให้เกิดประโยชน์โดยตรงต่อนักศึกษาในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง ในระดับ ปวส. ขึ้นไป
2. โปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) และชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) ที่ถูกพัฒนาขึ้น สามารถนำไปใช้ในการสร้างนิทรรศการเชิงปฏิสัมพันธ์เรื่องพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล เปิดโอกาสให้ประชาชนทั่วไปรวมถึงเยาวชน ได้มีโอกาสเรียนรู้ตามอัธยาศัย เพื่อสร้างความเข้าใจพื้นฐานของเทคโนโลยีที่คนส่วนมากมองว่าเป็นเรื่องลึกลับ ซับซ้อน และยากที่จะเข้าใจ
3. โปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) ที่ถูกพัฒนาขึ้น สามารถนำไปใช้ในการเรียนรู้ทางไกล (e-learning) โดยผู้เรียนสามารถทำการทดลองผ่านโปรแกรมเบราว์เซอร์ได้ เปิดโอกาสให้ผู้สนใจสามารถเรียนรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัลได้ตามอัธยาศัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเป็นมาและการพัฒนาการ

การจัดการศึกษาในหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) นั้น อยู่ภายใต้การกำกับดูแลของสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา (สอศ.) สังกัดกระทรวงศึกษาธิการ โดยหลักสูตรระดับ ปวส. ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสื่อสารแบบดิจิทัลโดยตรง ได้แก่ สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ และสาขาวิชาโทรคมนาคม [16] จากสถิติของศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและกำลังคนอาชีวศึกษา ในปี พ.ศ. 2556 มีจำนวนนักศึกษา ปวส. ในสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ และสาขาวิชาโทรคมนาคม ดังต่อไปนี้ [17]

- สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ ทั่วประเทศรวม 7,759 คน ในวิทยาลัย 146 แห่ง โดยวิทยาลัย 57 แห่งมีนักศึกษาในสาขาน้อยกว่า 50 คน
- สาขาวิชาโทรคมนาคม ทั่วประเทศรวม 2,190 คน ในวิทยาลัย 61 แห่ง โดยวิทยาลัย 19 แห่งมีนักศึกษาในสาขาน้อยกว่า 50 คน

สำหรับการประกันคุณภาพการเรียนการสอนในหลักสูตร ปวส. นั้น กระทรวงศึกษาธิการได้กำหนดกฎกระทรวงว่าด้วยระบบ หลักเกณฑ์ และวิธีการประกันคุณภาพการศึกษา พ.ศ. 2553 หมวด 2 การประกันคุณภาพภายในของสถานศึกษา ส่วนที่ 2 การอาชีวศึกษา ข้อ 22 ให้สถานศึกษาอาชีวศึกษาจัดให้มีระบบการประกันคุณภาพภายในตามหลักเกณฑ์ และแนวปฏิบัติเกี่ยวกับการประกันคุณภาพภายในการอาชีวศึกษา โดยสถานศึกษาแต่ละแห่ง จะแต่งตั้งคณะกรรมการคณะหนึ่งเรียกว่า คณะกรรมการประกันคุณภาพภายในการอาชีวศึกษา ซึ่งมีหน้าที่หลายประการ โดยรวมถึงการเสนอแนะแนวทางปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพการศึกษา ซึ่งมีผลต่อกระบวนการเรียนรู้และการฝึกประสบการณ์ [18] ดังนั้น จึงเป็นหน้าที่ของวิทยาลัยอาชีวศึกษาที่จะจัดสรรให้มีสื่อการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพอย่างเพียงพอ

อย่างไรก็ตาม จากการสอบถามจากอาจารย์ผู้สอนวิชาที่เกี่ยวข้องกับพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล จากวิทยาลัยอาชีวศึกษา 3 แห่ง ได้แก่ วิทยาลัยเทคนิคมินบุรี วิทยาลัยการอาชีพนวมินทร์ราชูทิศ และวิทยาลัยกาญจนาภิเษก มหานคร [2] พบว่าวิทยาลัยอาชีวศึกษาหลายแห่งขาดแคลนอุปกรณ์การทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีราคาสูงและวิทยาลัยไม่มีงบประมาณเพียงพอในการจัดซื้อให้มีปริมาณเหมาะสมกับจำนวนนักศึกษาที่ผ่านมานักศึกษาอาศัยการฝึกงานในสถานประกอบการจริง แต่การใช้งานอุปกรณ์ในระบบจริงนั้นไม่ได้สร้างความเข้าใจพื้นฐานเสมอไป จึงทำให้เกิดความต้องการสื่อการเรียนรู้ที่มีราคาย่อมเยา

ด้วยเหตุนี้ โครงการวิจัยจึงมุ่งพัฒนาสื่อการเรียนรู้สำหรับพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัลขึ้นเองในประเทศไทย เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนดังกล่าว ทีมงานตั้งเป้าหมายให้ราคาค่าต้นทุนของชุดทดลองประเภทฮาร์ดแวร์ต่ำกว่าการนำเข้าแบบสำเร็จรูปหลายเท่าตัว (ไม่เกิน 20,000 ต่อชุด โดยไม่รวมเครื่องคอมพิวเตอร์) ซึ่งการพัฒนาชุดทดลองใช้แนวทางของระบบสื่อสารแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ ซึ่งจะได้กล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

นอกจากการพัฒนาชุดทดลองแล้ว โครงการวิจัยนี้ยังพัฒนาโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) เพื่อช่วยลดการขาดแคลนในพื้นที่ที่ห่างไกล แต่ยังสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ โดยรายละเอียดของการพัฒนาโปรแกรมจำลองผลการทดลองนี้ จะได้กล่าวถึงในภายหลัง

2.2 ระบบสื่อสารแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์

ในปัจจุบัน เราสามารถประมวลสัญญาณแบบดิจิทัลได้โดยการเขียนโปรแกรมกำหนดหน้าที่ (ซึ่งก็คือการสร้างวงจรไฟฟ้าแบบดิจิทัล) ของอุปกรณ์เอฟพีจีเอ (field programmable gate array : FPGA) ซึ่งมีความสามารถในการประมวลผลเร็วถึงระดับ 10–100 เมกะเฮิรตซ์ [14, 15] ข้อได้เปรียบของเอฟพีจีเออย่างหนึ่ง คือสามารถทำหน้าที่ประมวลสัญญาณหลายแบบด้วยอุปกรณ์ชิ้นเดียวกัน ขึ้นอยู่กับโปรแกรมกำหนดหน้าที่ เปรียบเสมือนกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่สามารถทำหน้าที่ได้หลายอย่างตามโปรแกรมประยุกต์ที่ถูกเรียกใช้งาน

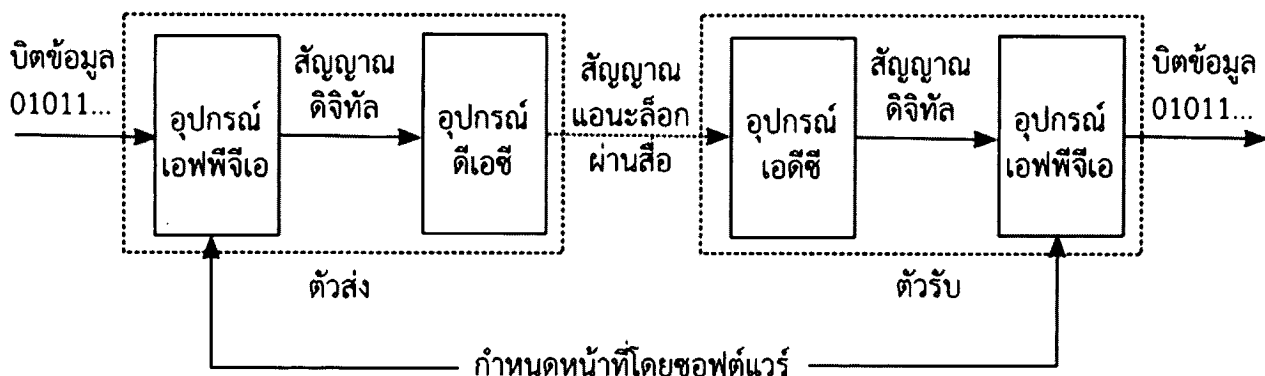
การส่งข้อมูลแบบดิจิทัลนั้น มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของสื่อ เช่นสายทองแดง สายใยแก้วนำแสง ช่วงคลื่นวิทยุ ในอากาศ เป็นต้น ลักษณะการประมวลสัญญาณจะแตกต่างกันระหว่างวิธีต่าง ๆ ซึ่งทำให้เราต้องอาศัยวงจรไฟฟ้าหลายรูปแบบ ดังนั้น สำหรับชุดทดลองที่จะแสดงการส่งข้อมูลหลายวิธีการใช้วงจรไฟฟ้าแบบดิจิทัลบนอุปกรณ์เอฟพีจีเอจะสะดวกกว่าการใช้วงจรไฟฟ้าแบบแอนะล็อกเป็นหลัก เนื่องจากเราสามารถใช้อุปกรณ์ชิ้นเดียวรองรับการส่งข้อมูลหลายวิธี อย่างไรก็ตาม เอฟพีจีเอมีข้อจำกัดในความเร็วของการสุ่มค่าสัญญาณ (sampling) ทำให้ไม่สามารถใช้แทนการประมวลสัญญาณด้วยวงจรไฟฟ้าแบบแอนะล็อกได้ทั้งหมด

แนวทางการสร้างระบบสื่อสารแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (software defined) นั้น เป็นความพยายามที่จะประมวลสัญญาณด้วยวงจรไฟฟ้าแบบดิจิทัลให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใช้วงจรไฟฟ้าแบบแอนะล็อกเท่าที่จำเป็นจริง ๆ เท่านั้น [15] เพื่อให้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้น สะดวกต่อการใช้งาน และไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เสริมมากนัก นอกเหนือจากเอฟพีจีเอเพียงชิ้นเดียวสำหรับตัวรับหรือตัวส่ง โครงการนี้จึงใช้แนวทางการสร้างระบบสื่อสารแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ ใช้เอฟพีจีเอเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในการพัฒนาชุดทดลอง และพัฒนางจรไฟฟ้าแบบแอนะล็อกเท่าที่จำเป็นต่อการทำงานของระบบโดยรวม

การพัฒนาชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลโดยใช้อุปกรณ์เอฟพีจีเอ มีการรายงานอยู่ใน [19] ซึ่งใช้ลำโพงและไมโครโฟนเป็นอุปกรณ์ตัวรับตัวส่งข้อมูล อย่างไรก็ตาม เนื่องจากช่องสัญญาณเสียงระหว่างลำโพงและไมโครโฟนนั้นมีแบนด์วิดท์ (bandwidth) ที่จำกัดและการส่งแบบไร้สายนั้นมีสัญญาณรบกวนสูง ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ตัวรับมีความผิดเพี้ยนมาก โครงการนี้จึงใช้ช่องสัญญาณแบบสายโคแอก (coaxial cable) เพื่อลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ตัวรับ ซึ่งจะเหมาะสมต่อการเรียนรู้พื้นฐานของการส่งสัญญาณมากกว่า

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของระบบสื่อสารแบบดิจิทัลแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ ในการสื่อสารแบบดิจิทัล ข้อมูลต่าง ๆ ที่ถูกส่งจะอยู่ในรูปของบิตข้อมูล (ตัวเลข 0 และ 1) ตัวส่งจะทำการแปลงบิตข้อมูลให้อยู่ในรูปสัญญาณข้อมูล ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการส่งผ่านสื่อกายภาพ โดยการเตรียมสัญญาณนี้เริ่มจากการประมวลสัญญาณแบบดิจิทัล

(digital signal processing : DSP) และสิ้นสุดด้วยการแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อกด้วยอุปกรณ์ดีเอซี (digital-to-analog converter : DAC) ในทางกลับกัน ตัวรับจะทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยอุปกรณ์เอดีซี (analog-to-digital converter : ADC) ตามด้วยการประมวลสัญญาณแบบดิจิทัลเพื่อตรวจจับบิตข้อมูลคืนมาจากสัญญาณที่ตัวรับรับได้



รูปที่ 2.1: โครงสร้างของระบบสื่อสารแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์

2.3 โปรแกรมจำลองผลการทดลองส่งบิตข้อมูล

โปรแกรมจำลองผลการทดลองส่งบิตข้อมูล สามารถหาได้ใน [11, 12] ซึ่งจะแสดงสัญญาณข้อมูลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ การส่งข้อมูลเป็นไปได้ทั้งแบบใช้แถบความถี่ฐาน (baseband) ที่ไม่ต้องอาศัยคลื่นพาห์ (carrier signal) และแบบใช้แถบความถี่ผ่าน (passband ที่ต้องอาศัยคลื่นพาห์

ผลของโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล มักจะแสดงในรูปของกลุ่มค่าสัญญาณ (signal set หรือ constellation) ทางหน้าจอคอมพิวเตอร์และอัตราบิตที่ผิดพลาด (bit error rate: BER) โดยค่าอัตราบิตที่ผิดพลาดนี้ยังมีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ซึ่งให้ผลที่เราสามารถใช้เทียบกับผลการทดลองจากโปรแกรมได้

ข้อจำกัดของโปรแกรมจำลองผลการทดลองคือสามารถส่งบิตข้อมูลที่มีจำนวนจำกัดเท่านั้น ไม่สามารถส่งข้อมูลต่อเนื่องได้เหมือนในระบบสื่อสารจริง แต่ข้อได้เปรียบของโปรแกรมจำลอง คือสามารถสร้างขึ้นได้โดยอาศัยซอฟต์แวร์คำนวณเชิงคณิตศาสตร์ที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อ เช่นโปรแกรม Octave [20] ซึ่งมีความสามารถคล้ายคลึงกับโปรแกรมคำนวณ MATLAB [8] ที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อ และนักศึกษาสามารถทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมได้เองในสถานที่และเวลาต่าง ๆ ตามอัธยาศัย

การใช้ลำโพงและไมโครโฟนเป็นอุปกรณ์ตัวรับตัวส่งเพื่อสาธิตการส่งข้อมูลแบบดิจิทัลนั้น มีการสาธิตอยู่ใน [19] อย่างไรก็ตาม การทดลองใน [19] จะต้องอาศัยอุปกรณ์เสริมนอกเหนือจากเครื่องคอมพิวเตอร์ธรรมดา การใช้ไมโครโฟนของเครื่องคอมพิวเตอร์ในการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลมีอยู่ใน [21] อย่างไรก็ตาม การทดลองใน [21] ใช้ไมโครโฟนอัดเสียงผู้ใช้ชุดทดลอง และแสดงการเปลี่ยนข้อมูลเสียงเป็นบิตซึ่งถูกส่งแบบดิจิทัลผ่านช่องสัญญาณจำลอง ไม่มีการใช้ลำโพงเป็นตัวส่งสัญญาณและใช้ช่องสัญญาณจริง

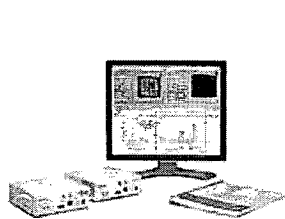
โปรแกรมจำลองผลการทดลองที่กล่าวมาทั้งหมด ยังไม่มีโปรแกรมไหนที่ให้ผู้ใช้งานทำการทดลองผ่านหน้าจอของโปรแกรมเบราว์เซอร์ (browser) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป เช่น Internet Explorer และ Google Chrome เนื่องจากโครงการนี้มุ่งพัฒนาสื่อประเภทซอฟต์แวร์ที่สามารถนำไปใช้ในการเรียนรู้ทางไกล (e-learning) ได้เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนสื่อการเรียนรู้ จึงมุ่งพัฒนาโปรแกรมจำลองผลการทดลองที่สามารถเรียกใช้ผ่านโปรแกรมเบราว์เซอร์ได้โดยไม่ขึ้นกับระบบปฏิบัติการ (operating system) ของเครื่องคอมพิวเตอร์

แนวทางการพัฒนาโปรแกรมจำลองผลการทดลองประเภทที่ใช้ผ่านโปรแกรมเบราว์เซอร์ คือการเขียนโปรแกรมในลักษณะของจาวาสคริปต์ (JavaScript) [22] ซึ่งสามารถคำนวณทางคณิตศาสตร์ได้ขึ้นอยู่กับข้อมูลนำเข้าจากผู้ใช้งาน ทำให้เกิดการใช้งานเชิงปฏิสัมพันธ์ได้ เช่นโปรแกรมสามารถคำนวณและแสดงสัญญาณข้อมูลใหม่หลังจากที่ผู้ใช้เปลี่ยนแปลงบิตข้อมูลที่จะถูกส่ง เป็นต้น

2.4 ชุดทดลองแบบสำเร็จรูปที่มีอยู่ในท้องตลาด

ชุดทดลองแบบสำเร็จรูปที่มีขายอยู่ในปัจจุบัน สามารถนำมาใช้เป็นสื่อการเรียนรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัลได้ บริษัทผลิตชุดทดลองที่เป็นที่รู้จักดีที่สุดบริษัทหนึ่งคือ National Instrument (NI) ซึ่งผลิตชุดทดลองสำเร็จรูปดังแสดงในรูปที่ 2.2 พร้อมกับราคาจำหน่ายที่ 223,100 บาทต่อชุด (มิถุนายน พ.ศ. 2559) [4]

NI Digital Communications Teaching Bundle Hands-On Experimentation in RF and Communications



[+/-] Enlarge Picture

 View Data Sheet

- Affordable teaching solution that scales to research applications
- Ready-to-teach digital communications courseware by Prof. Robert W. Heath Jr., Ph.D., PE.
- Transmit/receive pair of NI USRP-2920 transceivers (50 MHz to 2.2 GHz)
- Covers FM radio, GPS, GSM, radar, and ISM bands
- NI technical support and 1-year extendable warranty

Overview

Pricing

Resources



Credit card payment will be billed in USD, which is subjected to the prevailing bank exchange rate. Price does not include custom duties and taxes.

Digital Communications Bundle

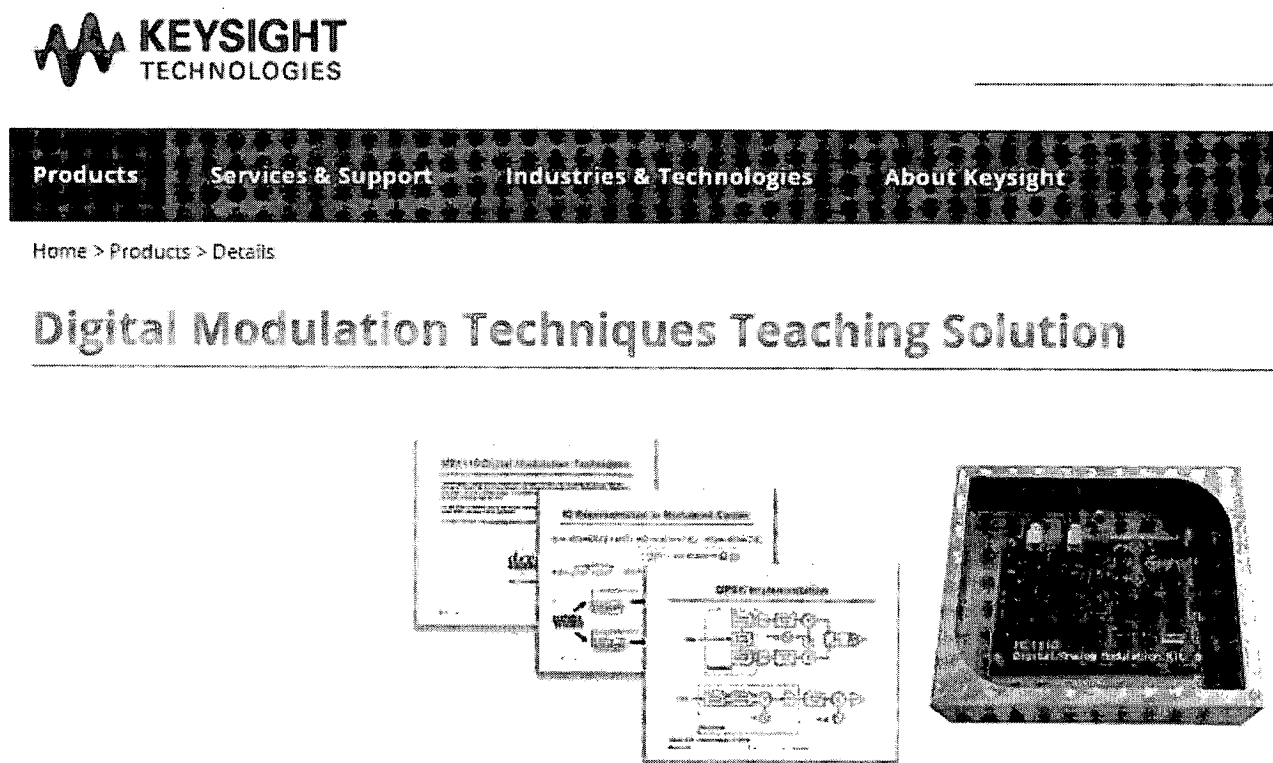
Bundle Contents

Estimated Shipping Days : 7 - 10

Price: B 223,100

รูปที่ 2.2: ชุดทดลองสำเร็จรูปจากบริษัท National Instruments สำหรับพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล [4]

รูปที่ 2.3 แสดงชุดทดลองจากบริษัท Keysight Technologies ซึ่งไม่มีราคาแสดงในเว็บไซต์ แต่จากการสำรวจพบว่าราคาไม่ต่ำกว่าชุดทดลองจากบริษัท National Instruments เนื่องจากผู้ใช้งานจะต้องมีอุปกรณ์เสริมอื่น ๆ อีก เช่นออสซิลโลสโคป



รูปที่ 2.3: ชุดทดลองสำเร็จรูปจากบริษัท Keysight Technologies สำหรับพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล [3]

อย่างไรก็ตาม ราคาของชุดทดลองสำเร็จรูปดังกล่าวข้างต้น ยังไม่รวมราคาของซอฟต์แวร์ที่จะต้องใช้ในการดูสัญญาณผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ เช่นซอฟต์แวร์ Labview สำหรับชุดทดลองของบริษัท National Instruments ซึ่งมีราคา 62,000 บาท (มิถุนายน พ.ศ. 2559) [4] จากราคาที่สูงมากของชุดทดลองสำเร็จรูป ทำให้สถานศึกษาไม่สามารถจัดหาได้ในปริมาณที่เพียงพอต่อจำนวนนักศึกษา ซึ่งเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้

เป็นที่น่าสังเกตว่า ชุดทดลองแบบสำเร็จรูปนั้น จะมากับคู่มือการเรียนการสอนและใบงานสำหรับการทดลอง ดังนั้น การพัฒนาคู่มือการเรียนการสอนที่จะใช้คู่กับชุดทดลองจึงเป็นส่วนหนึ่งของโครงการนี้ด้วย

3.1 การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับความต้องการรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล

โครงการสำรวจความต้องการรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัลในวิทยาลัยอาชีวศึกษา 3 แห่งที่มีความร่วมมือกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาลัยการอาชีวศึกษาสมุทรสาคร และวิทยาลัยการอาชีวศึกษาพิษณุโลก มหานคร โดยเริ่มจากการประชุมระหว่างสองสถาบันการศึกษาทั้ง 4 แห่ง ในวันที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2556 ณ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ วิทยาลัยการศึกษามหาวิทยาลัยกรุงเทพ [2]

หลังจากการประชุม ทีมงานวิจัยได้เชิญผู้เชี่ยวชาญวิทยาลัยทั้ง 3 แห่ง เพื่อศึกษาข้อมูลความต้องการรู้โดยละเอียด โดยได้เข้าพบและพูดคุยกับอาจารย์ประจำคณะทำงานของวิทยาลัยทั้ง 3 แห่ง ดังต่อไปนี้

1. วิทยาลัยเทคนิคธนบุรี

อาจารย์ประจำคณะทำงาน: อ.มนต์วี ประชาวณิช

สถานที่ติดต่อ: เลขที่ 57 ถนนสีหบุรย์กิจ แขวงมณีนบุรี เขตมณีนบุรี กทม. 10510

หมายเลขโทรศัพท์: 089-481-6341

2. วิทยาลัยการอาชีวศึกษาสมุทรสาคร

อาจารย์ประจำคณะทำงาน: อ.สมณธร พิมพ์มณี

สถานที่ติดต่อ: เลขที่ 11/11 ซอยนาถจันทร์ 56 แขวงนาถจันทร์ เขตปทุมธานี กทม. 10230

หมายเลขโทรศัพท์: 083-087-4694, 098-840-1377

3. วิทยาลัยการอาชีวศึกษาพิษณุโลก

อาจารย์ประจำคณะทำงาน: อ.กิตติพงษ์ ช่อทองดี

สถานที่ติดต่อ: เลขที่ 73 หมู่ที่ 18 ถนนคุ้มเกล้า แขวงแสงสาม เขตมณีนบุรี กทม. 10510

หมายเลขโทรศัพท์: 089-789-8567

ลักษณะการขาดแคลนและความต้องการรู้ของวิทยาลัยอาชีวศึกษาทั้ง 3 แห่ง จะแตกต่างกันออกไปตาม

ในรายละเอียดต่อไปนี้

3.2 การกำหนดประชากร และกลุ่มตัวอย่างผู้ให้ข้อมูล

หลังจากการพัฒนารูปแบบการรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัลแล้ว ทีมงานประเมินโปรแกรมจำลองผลการทดลอง

(ซอฟต์แวร์) และชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) โดยจัดอบรมเชิงปฏิบัติการ 2-3 ครั้ง (2 ครั้งสำหรับโปรแกรมและ 3 ครั้ง

สำหรับชุดทดลอง) แต่ละครั้งมีผู้เข้าร่วมอบรมอย่างน้อย 10 คน และเปลี่ยนให้ผู้ใช้ไปซ้ำไปมาแบบไม่ติดต่อกัน

นอกจากนั้น การทดลองใช้ชุดทดลองในสถานศึกษาจริง จัดขึ้นที่วิทยาลัยการอาชีพพนมทราซุทิศ และวิทยาลัย กาญจนานิเชก มหานคร โดยมีจำนวนนักศึกษา 8 คนและ 12 คนตามลำดับ สำหรับวิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี เนื่องจาก วิทยาลัยไม่ได้เปิดสอนวิชาที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารแบบดิจิทัลในภาคปลายของปีการศึกษา พ.ศ. 2559 กิจกรรมใน โครงการจึงเป็นเพียงการทดลองเพื่อให้นักศึกษาได้ประสบการณ์ส่งข้อมูลจริง แต่ไม่ได้เก็บข้อมูลจากนักศึกษาเพื่อนำมาวิเคราะห์แต่อย่างใด

3.3 การกำหนดเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

การประเมินโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) และชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) ในการอบรมเชิงปฏิบัติการ ใช้แบบสอบถามความคิดเห็นซึ่งมีรายละเอียดอยู่ในเอกสารแนบ ก โดยเป็นการถามประเด็นความยากง่ายของการใช้งาน และประโยชน์ในแง่ของการเสริมความเข้าใจพื้นฐาน

ส่วนการประเมินประสิทธิภาพของการใช้ชุดทดลองในการเรียนการสอนจริง ใช้แบบทดสอบความรู้พื้นฐานซึ่งมีรายละเอียดอยู่ในเอกสารแนบ ข ซึ่งเป็นแบบทดสอบแบบปรนัยจำนวน 20 ข้อ

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูลในการวิจัย

การจัดอบรมเชิงปฏิบัติการที่ใช้โปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) และใช้ชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) จัดในช่วงเดือนมิถุนายน-กรกฎาคม พ.ศ. 2558 โดยการอบรมและการรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถาม ดำเนินการโดยทีมงานวิจัยเอง ส่วนการจัดการเรียนการสอนจริงในวิทยาลัยอาชีวศึกษารวมถึงการทดสอบประเมินความรู้พื้นฐาน ดำเนินการโดยอาจารย์ผู้สอนวิชาที่เกี่ยวข้องในแต่ละวิทยาลัย ในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2557-มีนาคม พ.ศ. 2558

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้

เนื่องจากจำนวนผู้เข้าอบรมเชิงปฏิบัติการและจำนวนนักศึกษาที่ใช้ชุดทดลองในการเรียนการสอนจริงมีจำนวนไม่มากนัก (20-30 คน) โครงการวิจัยนี้จึงใช้เพียงค่าเฉลี่ยหรือคะแนนรวมในการรวบรวมความเห็นและการประเมินประสิทธิภาพของสื่อการเรียนรู้ที่ถูกพัฒนาขึ้น

อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากการเก็บข้อมูลจากแบบสอบถาม ทีมงานได้ขอความเห็นจากอาจารย์ผู้สอนในวิทยาลัยอาชีวศึกษา ซึ่งเป็นคำถามเปิด เพื่อให้อาจารย์ผู้สอนสามารถออกความเห็นได้อย่างเต็มที่โดยไม่มีข้อจำกัดใด ๆ ในลักษณะของคำถามที่ใช้

3.6 การจัดทำสื่อการเรียนรู้พร้อมทั้งคู่มือ

3.6.1 การกำหนดหัวข้อกิจกรรมการเรียนรู้สำหรับ 16 สัปดาห์

การกำหนดหัวข้อกิจกรรมการเรียนรู้ในโครงการย่อยที่ 1 จัดทำขึ้นหลังจากทีมงานได้เยี่ยมชมและขอคำปรึกษาจาก

อาจารย์ในวิทยาลัยอาชีวศึกษา 3 แห่ง นอกจากนั้น ทีมงานได้คัดเลือกเนื้อหาจากวิชาการระบบสื่อสารดิจิทัล รหัส 3105-9009 ในหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ. 2557 ผลลัพธ์คือ กิจกรรมการเรียนรู้สำหรับ 16 สัปดาห์ ๆ ละ 1 ชั่วโมง หัวข้อกิจกรรมการเรียนรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล ซึ่งรวมถึงพื้นฐานความรู้ที่เกี่ยวข้อง และรูปแบบการส่งข้อมูลโดยทั่วไป มีดังต่อไปนี้

1. สัญญาณพื้นฐานและคุณสมบัติ
2. การใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล
3. การกรองสัญญาณเบื้องต้น
4. การใช้ตัวกรองจับคู่
5. การส่งบิตข้อมูลแบบ PAM
6. การส่งบิตข้อมูลแบบ PWM
7. การส่งบิตข้อมูลแบบ PPM
8. การส่งบิตข้อมูลแบบ ASK
9. การส่งบิตข้อมูลแบบ FSK
10. การส่งบิตข้อมูลแบบ PSK
11. การส่งบิตข้อมูลแบบ QAM (ตอนที่ 1/2)
12. การส่งบิตข้อมูลแบบ QAM (ตอนที่ 2/2)
13. การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA และ FDMA
14. การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA
15. การเข้ารหัสตรวจจับข้อผิดพลาด
16. การเข้ารหัสแก้ไขข้อผิดพลาด

ถึงแม้กิจกรรมการทดลองจะคัดเลือกเนื้อหาจากวิชาการระบบสื่อสารดิจิทัล ในหลักสูตร ปวส. แต่กิจกรรมการทดลองที่ทีมงานจัดทำขึ้นในโครงการวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ได้โดยทั่วไป ซึ่งรวมถึงการนำไปใช้ช่วยการเรียนการสอนในระดับอุดมศึกษาอีกด้วย (โดยอาจเป็นส่วนหนึ่งของการทดลองทั้งหมดสำหรับวิชาที่เกี่ยวข้อง)

3.6.2 การจัดทำสื่อประเภทโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์)

ในโครงการย่อยที่ 1 ทีมงานมุ่งพัฒนาโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) ให้สามารถใช้ได้ผ่านโปรแกรมเบราว์เซอร์โดยไม่ขึ้นอยู่กับระบบปฏิบัติการของเครื่องคอมพิวเตอร์ และยังสามารถใช้กับ tablet PC และ smart phone ได้อีกด้วย โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. โปรแกรมจำลองผลการทดลองครอบคลุมเนื้อหาที่จัดเป็นพื้นฐานที่สำคัญของการสื่อสารแบบดิจิทัล
2. โปรแกรมสามารถแสดงสัญญาณข้อมูลที่ส่วนต่าง ๆ ของระบบสื่อสาร เช่นสัญญาณข้อมูลจากตัวส่ง สัญญาณที่ตัวรับรับได้ และสัญญาณที่ผ่านการประมวลผลที่ตัวรับ
3. โปรแกรมอนุญาตให้ผู้ใช้งานเปลี่ยนบิตข้อมูลที่จะถูกส่งและสังเกตผลกระทบที่เกิดขึ้น เช่นเห็นสัญญาณข้อมูลที่เปลี่ยนไป
4. โปรแกรมสามารถทำงานได้ทั้งแบบจากเครื่องคอมพิวเตอร์โดยไม่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต และแบบผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต
5. การพัฒนาโปรแกรมไม่มีค่าใช้จ่ายทางลิขสิทธิ์ของซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องใด ๆ

ในการพัฒนาโปรแกรกดังกล่าว ทีมงานใช้จาวาสคริปต์ (JavaScript) [22] ซึ่งสามารถทำงานได้บนโปรแกรมเบราว์เซอร์ที่ใช้กันแพร่หลาย เช่น Internet Explorer และ Google Chrome ในโปรแกรมจำลองผลการทดลอง อุปกรณ์หลักในระบบสื่อสารถูกพัฒนาเป็นจาวาสคริปต์ ซึ่งรวมถึงตัวส่ง ตัวรับ ตัวเข้ารหัสบิตข้อมูล ตัวถอดรหัสบิตข้อมูล ตัวมอดูเลตสัญญาณ ตัวดีมอดูเลตสัญญาณ ตัวสร้างสัญญาณพัลส์ ตัวกรองจับคู่ และช่องสัญญาณ

นอกจากการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการประมวลสัญญาณ โปรแกรมยังแสดงรูปสัญญาณผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยการแสดงรูปสัญญาณ อาศัยกลุ่มของคำสั่ง plotcharts ที่ใช้วาดกราฟจากฟังก์ชันต่าง ๆ ได้

3.6.3 การจัดทำสื่อประเภทชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์)

ในโครงการย่อยที่ 2 ทีมงานพัฒนาชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) โดยมีอุปกรณ์หลักดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์เอฟพีจีเอ (field programmable gate array : FPGA) ใช้สำหรับประมวลสัญญาณแบบดิจิทัล (digital signal processing : DSP) โดยทีมงานใช้เอฟพีจีเอรุ่น Cyclone III จากบริษัท Altera ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของ development and education board รุ่น DE0 [23] ในโครงการนี้ ทีมงานสั่งซื้ออุปกรณ์นี้จากบริษัท Terasic
2. อุปกรณ์ดีเอซี (digital-to-analog converter : DAC) ใช้แปลงสัญญาณดิจิทัลจากเอฟพีจีเอเป็นสัญญาณแอนะล็อก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นเพราะสัญญาณที่จะส่งผ่านสายส่ง จะต้องอยู่ในรูปของสัญญาณแอนะล็อกเท่านั้น ในโครงการนี้ทีมงานพัฒนาอุปกรณ์ดีเอซีขึ้นเองในศูนย์วิจัย BU-CROCCS (Bangkok University-Center of Research in Optoelectronics, Communications, and Control Systems) ในมหาวิทยาลัยกรุงเทพ วิทยาเขตรังสิต
3. อุปกรณ์เอดีซี (analog-to-digital converter : ADC) ใช้แปลงสัญญาณแอนะล็อกที่ตัวรับรับได้จากสายส่งเป็นสัญญาณดิจิทัลให้เอฟพีจีเอประมวลผลเพื่อรับบิตข้อมูลต่อไป เช่นเดียวกับอุปกรณ์ดีเอซี ศูนย์วิจัย BU-CROCCS ในมหาวิทยาลัยกรุงเทพสามารถพัฒนาอุปกรณ์ชิ้นนี้ได้เอง

4. โปรแกรมกำหนดหน้าที่ของเอฟพีจีเอทั้งฝั่งตัวส่งและฝั่งตัวรับ ใช้กำหนดหน้าที่ของระบบสื่อสารตามเนื้อหา ของกิจกรรมการเรียนรู้ในสัปดาห์ต่าง ๆ ของภาคเรียน ในโครงการนี้ ทีมงานพัฒนาโปรแกรมขึ้นด้วยภาษา Verilog และใช้คอมไพเลอร์ (compiler) ของซอฟต์แวร์ Quartus II Web Edition v12.1 จากบริษัท Altera ซึ่งไม่มีค่าลิขสิทธิ์ใด ๆ ในการใช้งาน [24]

ส่วนคุณสมบัติของชุดทดลองในการเรียนการสอน กำหนดให้สอดคล้องกับคุณสมบัติข้อ 1-3 สำหรับโปรแกรม จำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) ดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่แล้ว

3.6.4 การจัดทำคู่มือกิจกรรมการเรียนรู้

การใช้สื่อการเรียนรู้อย่างมีประสิทธิภาพ จะต้องมีการใช้งานและใบงานสำหรับแต่ละกิจกรรมการเรียนรู้ โดยใน แต่ละกิจกรรม ทีมงานได้จัดทำคู่มือซึ่งมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1. วัตถุประสงค์ของแต่ละกิจกรรมการเรียนรู้
2. การทบทวนความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งรวมถึงการตอบคำถามพื้นฐานที่อาจจะเกี่ยวข้องกับการคำนวณ เบื้องต้น
3. แบบฝึกหัดในกรณีที่ไม่มีการทดลอง หรือวิธีการทดลองในกรณีที่มีการทดลอง
4. ใบงานที่นักศึกษาจะต้องบันทึกผลและตอบคำถามเพื่อส่งให้อาจารย์ผู้สอนหลังกิจกรรม

3.7 การนำสื่อให้อาจารย์ผู้สอนได้ทดลองใช้

สำหรับชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) ที่ใช้ในการเรียนการสอนจริงในโครงการย่อยที่ 3 ทีมงานได้ส่งมอบชุดทดลอง (แบบ ให้ยืม) พร้อมคู่มือให้แก่อาจารย์ผู้สอนพร้อมกับจัดอบรมแบบตัวต่อตัวที่วิทยาลัยในช่วง 1 เดือนก่อนการนำไปใช้จริง (พฤศจิกายน-ธันวาคม พ.ศ. 2557) ดังนั้น หลังการอบรม อาจารย์ผู้สอนสามารถใช้ชุดทดลองเรียนรู้ด้วยตนเองตาม อรรถาธิบาย รูปที่ 3.1-3.2 แสดงตัวอย่างการนำชุดทดลองไปส่งมอบแก่วิทยาลัยอาชีวศึกษา และการฝึกอบรมอาจารย์ ผู้สอนตามลำดับ

ในการอบรมแบบตัวต่อตัวนั้น ใช้เอกสารคู่มือกิจกรรมการเรียนรู้เป็นหลักสูตร อาจารย์ผู้เข้าอบรมได้ตอบคำถาม แบบฝึกหัด ปฏิบัติการทดลอง และตอบคำถามใบงานเปรียบเสมือนกับนักศึกษาผู้ทำการทดลอง เพื่อความเข้าใจที่ ชัดเจนและความพร้อมในการให้ความช่วยเหลือแก่นักศึกษาระหว่างการเรียนการสอนจริง วิทยาลัยอาชีวศึกษา 2 แห่งที่ ได้นำชุดทดลองไปใช้ในการเรียนการสอนจริง ได้แก่

1. วิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ

อาจารย์ผู้สอน: อ.สมณธร พุ่มพิมล

สถานที่ติดต่อ: เลขที่ 11/11 หมู่ที่ 11 ซอยนวลจันทร์ 56 แขวงนวลจันทร์ เขตบึงกุ่ม กทม. 10230

หมายเลขโทรศัพท์: 083-087-4694, 098-840-1377

2. วิทยาลัยกาญจนภิเษก มหานคร

อาจารย์ผู้สอน: อ.เอกพจน์ คล้ายเขียว

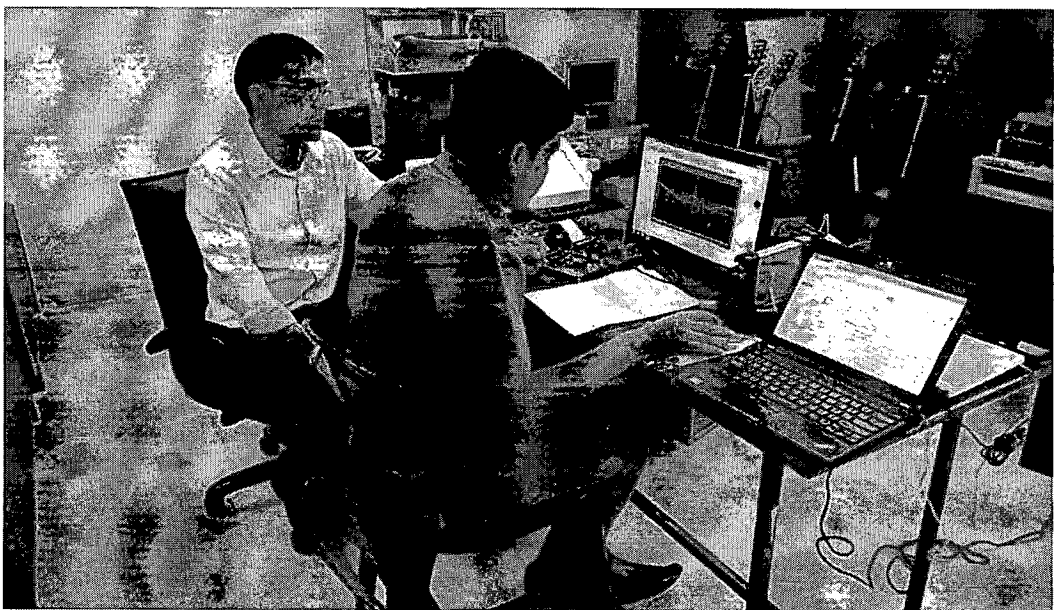
สถานที่ติดต่อ: เลขที่ 73 หมู่ที่ 18 ถนนคุ้มเกล้า แขวงแสนแสบ เขตมีนบุรี กทม. 10510

หมายเลขโทรศัพท์: 087-198-8550

สำหรับวิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี ทีมงานได้เข้าสาธิตการใช้ชุดทดลองเอง เนื่องจากไม่มีอาจารย์ที่พร้อมทำการสอนด้วยตนเองในภาคปลายของปีการศึกษา พ.ศ. 2557



รูปที่ 3.1: การส่งมอบชุดทดลองแก่ อ.สมณธร พุ่มพิมล วิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ



รูปที่ 3.2: การฝึกอบรมอาจารย์ผู้สอน (อ.เอกพจน์ คล้ายเขียว) ในวิทยาลัยกาญจนภิเษก มหานคร

3.8 การประเมินความเหมาะสมของสื่อการเรียนรู้

การประเมินความเหมาะสมของสื่อการเรียนรู้ทั้งในประเภทโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) และชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) อาศัยความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่านซึ่งมีประสบการณ์สอนและทำวิจัยในสาขาวิชาการสื่อสารแบบดิจิทัล ดังต่อไปนี้

1. ผู้ทรงคุณวุฒิ: รศ.ดร.ลัญฉกร วุฒิสถิธิกุลกิจ
สังกัด: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ความเชี่ยวชาญ: มีประสบการณ์การสอน เขียนตำราหลายเล่ม และเขียนบทความในวารสารทางวิชาการชั้นนำ ในเนื้อหาของวิชาการสื่อสารแบบดิจิทัล
2. ผู้ทรงคุณวุฒิ: ดร.วัชรพันธ์ สุวรรณสันติสุข
สังกัด: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ความเชี่ยวชาญ: มีประสบการณ์การสอนและเขียนบทความในวารสารทางวิชาการชั้นนำ ในเนื้อหาของวิชาการสื่อสารแบบดิจิทัล
3. ผู้ทรงคุณวุฒิ: ผศ.ดร.อัฐพงษ์ เทพารักษ์ษณากร
สังกัด: ภาควิชาโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที)
ความเชี่ยวชาญ: มีประสบการณ์การสอนและเขียนบทความในวารสารทางวิชาการชั้นนำ ในเนื้อหาของวิชาการสื่อสารแบบดิจิทัล

ผู้ทรงคุณวุฒิแต่ละท่านจะได้เห็นการสาธิตการใช้โปรแกรมและชุดทดลอง และได้มีโอกาสใช้โปรแกรมและชุดทดลองด้วยตนเองตามอัธยาศัย จากนั้นให้ความคิดเห็นพร้อมข้อเสนอแนะต่อทีมงาน โดยแบบสอบถามความคิดเห็นอยู่ในเอกสารแนบ ค

3.9 การกำกับติดตามการใช้สื่อการเรียนรู้

ทีมงานแวะเข้าเยี่ยมชมการเรียนการสอนด้วยชุดทดลองในวิทยาลัยอาชีวศึกษาเป็นระยะ ๆ เพื่อสอบถามความเห็นและซ่อมแซมหรือปรับแต่งอุปกรณ์ในชุดทดลองตามความเหมาะสม ในบางครั้งอาจารย์ผู้สอนและทีมงานได้สนทนาผ่านโทรศัพท์เพื่อชี้แจงและแก้ไขปัญหาในเบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้งานชุดทดลอง รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างของการเข้าเยี่ยมชมการเรียนการสอนจริงในวิทยาลัยอาชีวศึกษา



รูปที่ 3.3: การเข้าเยี่ยมชมการเรียนการสอนจริงที่วิทยาลัยกาญจนาภิเษก มหานคร

3.10 การประเมินผลการใช้สื่อการเรียนรู้

การประเมินประสิทธิภาพของการใช้ชุดทดลองในการเรียนการสอนจริง ใช้แบบทดสอบความรู้พื้นฐานซึ่งมีรายละเอียดอยู่ในเอกสารแนบ ข การจัดการสอบวัดความรู้พื้นฐาน ดำเนินการโดยอาจารย์ผู้สอนของวิทยาลัย อาชีวศึกษาเอง แบบสอบถามมีทั้งหมด 20 ข้อ เป็นคำถามแบบปรนัย ที่มีเนื้อหาสอดคล้องกับเนื้อหาในกิจกรรมการเรียนรู้ 16 สัปดาห์ตลอดภาคเรียน

3.11 การได้สื่อการเรียนรู้และคู่มือฉบับสมบูรณ์

เมื่อสิ้นสุดโครงการวิจัยนี้ ผลผลิตที่ได้คือสื่อการเรียนรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล ทั้งแบบโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) และแบบชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) พร้อมทั้งคู่มือกิจกรรมการเรียนรู้จำนวน 16 กิจกรรม ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้ในการเรียนการสอนจริงเป็นเวลา 1 ภาคเรียน

อย่างไรก็ตาม สื่อการเรียนรู้นี้ มีไว้เพื่อเสริมการเรียนรู้ แต่ไม่ใช่การทดแทนตำราในวิชาที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารแบบดิจิทัล ดังนั้น อาจารย์ผู้สอนยังจะต้องมีตำราหรือเอกสารประกอบการสอนสำหรับการเรียนการสอนทางทฤษฎีควบคู่ไปกับการใช้สื่อการเรียนรู้จากโครงการนี้

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาวิเคราะห์และสังเคราะห์เพื่อพัฒนาสื่อการเรียนรู้

จากการเยี่ยมชมและสนทนากับอาจารย์ที่เกี่ยวข้องกับวิชาการสื่อสารแบบดิจิทัลในสถาบันอาชีวศึกษา 3 แห่ง ได้แก่ วิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี วิทยาลัยนวมินทราชูทิศ และวิทยาลัยกาญจนาภิเษก มหานคร ในเขตกรุงเทพมหานคร ในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2557 พบว่าวิทยาลัยอาชีวศึกษาทั้ง 3 แห่งขาดแคลนอุปกรณ์การทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วิทยาลัยบางแห่งไม่มีอุปกรณ์การทดลองใด ๆ ทั้งสิ้น ส่วนแห่งที่เหลือนี้อุปกรณ์ แต่มีจำนวนเพียง 1-2 ชุด ซึ่งไม่เพียงพอกับจำนวนนักศึกษาในห้องเรียน
2. อุปกรณ์ที่วิทยาลัยมีอยู่บางส่วนเป็นการได้รับบริจาคจากทวีปยุโรป และมีอายุเกิน 20 ปี การบริจาคเกิดขึ้นในสมัยที่อุตสาหกรรมโทรคมนาคมยังไม่ก้าวหน้านักในประเทศไทย เนื่องจากในปัจจุบัน อุตสาหกรรมโทรคมนาคมในประเทศไทยได้พัฒนาไปอย่างมาก และรายได้ที่รัฐบาลเก็บได้จากผู้ให้บริการโทรคมนาคมสูงถึงหลักหมื่นล้าน [9] การรับบริจาคในลักษณะเดียวกันจึงไม่น่าจะเกิดขึ้นได้อีกในอนาคต โดยการบริจาคในลักษณะดังกล่าวคาดว่าจะเกิดขึ้นในประเทศเพื่อนบ้านแทน เช่นเมียนมาร์ ลาว และกัมพูชา
3. วิทยาลัยบางแห่ง อาศัยชั่วโมงฝึกงานในสถานประกอบการจริง ชดเชยการทดลองในสถาบันของตนเอง อย่างไรก็ตาม การปฏิบัติงานในสถานประกอบการส่วนใหญ่ เป็นการดูแลระบบที่ใช้งานอยู่จริง นักศึกษาไม่สามารถที่จะทำการทดลองบนเพื่อทดสอบความรู้ได้อย่างสะดวก เพราะจะไปกระทบคุณภาพการให้บริการของผู้ประกอบการ
4. นักศึกษาของวิทยาลัยอาชีวศึกษา ไม่มีพื้นฐานของการเขียนโปรแกรมคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ เช่นโปรแกรมที่เขียนด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB [8] ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระดับอุดมศึกษา ทำให้การเรียนรู้โดยการเห็นสัญญาณข้อมูลด้วยการให้นักศึกษาเขียนโปรแกรมจำลองผลการทดลองขึ้นเองไม่ใช่ทางเลือกที่จะนำไปใช้ได้ เนื่องจากการสอนการใช้โปรแกรมหากล่าวจะต้องใช้เวลา และมีรายละเอียดมากพอที่จะสร้างเป็นวิชาเลือกได้อีกวิชาหนึ่ง
5. วิทยาลัยอาชีวศึกษาทั้ง 3 แห่ง ไม่มีงบประมาณในอนาคตอันสั้นที่จะใช้จัดซื้ออุปกรณ์การทดลองที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารแบบดิจิทัลแบบสำเร็จรูปได้

จากเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมด จะเห็นได้ว่าปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์การทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลนั้น มีอยู่จริงในสถาบันการศึกษาหลายแห่งในประเทศไทย และยังไม่มีแนวโน้มการแก้ไขปัญหานั้นได้ชัดเจนในปัจจุบัน ในขณะเดียวกัน เทคโนโลยี “ดิจิทัล” ได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญที่จะขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทย ดังจะเห็นได้

จากแผนการเปลี่ยนชื่อของกระทรวง “ไอซีที” ไปเป็นกระทรวง “ดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม” ในเดือนกันยายน พ.ศ. 2559 [25]

นอกเหนือจากสถาบันอาชีวศึกษาทั้ง 3 แห่ง ทีมงานได้สนทนากับคณาจารย์จากวิทยาลัยเทคโนโลยีภาคตะวันออก (อี.เทค) ซึ่งเป็นสถาบันเอกชนในช่วงเวลาเดียวกัน โดยบุคคลติดต่อ ได้แก่ อ.ศุภวิทย์ แฉล้มกุล รองหัวหน้าแผนกช่างอิเล็กทรอนิกส์ (โทรศัพท์ 081-427-5432) จากการสนทนากับคณาจารย์ดังกล่าว พบว่าวิทยาลัยเอกชนดังกล่าวก็ประสบปัญหาขาดแคลนอุปกรณ์การทดลองเช่นเดียวกันกับวิทยาลัยของรัฐทั้ง 3 แห่งที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้น ปัญหาการขาดแคลนนี้นพบได้ทั้งในสถาบันอาชีวศึกษาของรัฐและของเอกชน

ในขณะเดียวกัน ทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพเอง ก็มีปัญหาขาดแคลนอุปกรณ์การทดลองสำหรับวิชาการสื่อสารแบบดิจิทัล โดยการเรียนรู้ที่ผ่านมายังอาศัยตำราเป็นหลัก จัดเป็นตัวอย่างหนึ่งของการขาดแคลนอุปกรณ์การทดลองในระดับอุดมศึกษา นอกเหนือจากการขาดแคลนในระดับอาชีวศึกษา

จากการขาดแคลนที่กล่าวมาทั้งหมด ทีมงานเห็นความสำคัญของการพัฒนาสื่อการเรียนรู้ขึ้นเองในประเทศ เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์การทดลอง ซึ่งจะช่วยส่งเสริมให้เกื้อหนุนความรู้ที่แข็งแกร่งขึ้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีดิจิทัลในประเทศไทย

4.2 ผลการสร้างงานวิจัยจากวัตถุประสงค์

4.2.1 เนื้อหากิจกรรมการเรียนรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล

ในโครงการย่อยที่ 1 ทีมงานได้กำหนดเนื้อหา กิจกรรมการเรียนรู้ทั้งหมดจำนวน 16 กิจกรรม ซึ่งเหมาะสมสำหรับการเรียนการสอนใน 1 ภาคเรียน เนื้อหา กิจกรรมอิงตามเนื้อหาบางส่วนของวิชาระบบสื่อสารดิจิทัล รหัส 3105-9009 ในหลักสูตร ปวส. สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ. 2557 โดยรายละเอียดของกิจกรรมและขั้นตอนการทดลองมาจากการระดมสมองภายในทีมงาน และการพูดคุยกับอาจารย์ผู้สอนในวิทยาลัยอาชีวศึกษา 3 แห่ง ได้แก่ วิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี วิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ และวิทยาลัยกาญจนาภิเษก มหานคร อย่างไรก็ตาม การนำกิจกรรมการเรียนรู้ไปใช้ ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการใช้งานสำหรับวิชาระบบสื่อสารดิจิทัลในหลักสูตร ปวส. เท่านั้น

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ทีมงานได้กำหนดขึ้น มีทั้งหมด 16 กิจกรรม มีหัวข้อกิจกรรมและวัตถุประสงค์ของกิจกรรมเป็นดังต่อไปนี้

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 1: สัญญาณพื้นฐานและคุณสมบัติ

- สามารถบ่งบอกคาบและความถี่ของสัญญาณพื้นฐานที่ใช้ในการส่งข้อมูลดิจิทัล
- สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงสัญญาณพื้นฐาน
- สามารถวาดภาพของสัญญาณพื้นฐานจากสมการทางคณิตศาสตร์

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 2: การใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล

- สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลได้อย่างถูกต้อง
- สามารถใช้โปรแกรมกำหนดหน้าที่ของฮาร์ดแวร์ตามหมายเลขกิจกรรม
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งสัญญาณรายคาบแบบต่าง ๆ และปรับเปลี่ยนคาบของสัญญาณ

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 3: การกรองสัญญาณเบื้องต้น

- สามารถบ่งบอกอัตราขยายของตัวกรองสัญญาณที่ความถี่ต่าง ๆ จากกราฟผลตอบแทนเชิงความถี่
- สามารถบ่งบอกสัญญาณขาออกของตัวกรองสัญญาณจากกราฟผลตอบแทนเชิงความถี่ โดยสัญญาณขาเข้ามีรูปไซน์ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งสัญญาณไซน์ผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ และดูสัญญาณขาออกสำหรับสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ต่าง ๆ กัน

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 4: การใช้ตัวกรองจับคู่

- สามารถบ่งบอกสัญญาณขาออกของตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่และตัวกรองจับคู่จากสัญญาณขาเข้า
- สามารถใช้ชุดทดลองสร้างสัญญาณที่ประกอบไปด้วยพัลส์สี่เหลี่ยมจากบิตข้อมูล
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งสัญญาณข้อมูลจากตัวส่ง และประมวลผลสัญญาณที่ตัวรับด้วยตัวกรองจับคู่

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 5: การส่งบิตข้อมูลแบบ PAM

- สามารถบ่งบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ PAM
- สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ PAM จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ และอัตราบิต
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PAM
- สามารถใช้ชุดทดลองแสดงผลกระทบของการตั้งเวลา (synchronization) ที่ตัวรับไม่ตรงกับเวลาที่ตัวส่ง

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 6: การส่งบิตข้อมูลแบบ PWM

- สามารถบ่งบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ PWM
- สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ PWM จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ และอัตราบิต
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PWM

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 7: การส่งบิตข้อมูลแบบ PPM

- สามารถบ่งบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ PPM
- สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ PPM จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ และอัตราบิต
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PPM

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 8: การส่งบิตข้อมูลแบบ ASK

- สามารถบ่งบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ ASK
- สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ ASK จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ อัตราบิต และความถี่ของคลื่นพาห์
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ ASK

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 9: การส่งบิตข้อมูลแบบ FSK

- สามารถบ่งบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ FSK
- สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ FSK จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ อัตราบิต และความถี่ของคลื่นพาห์
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ FSK

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 10: การส่งบิตข้อมูลแบบ PSK

- สามารถบ่งบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ PSK
- สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ PSK จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ อัตราบิต และความถี่ของคลื่นพาห์
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PSK

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 11: การส่งบิตข้อมูลแบบ QAM (ตอนที่ 1/2)

- สามารถบ่งบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ QPSK ซึ่งเป็นกรณีหนึ่งของสัญญาณ QAM
- สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ QPSK จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ อัตราบิต และความถี่ของคลื่นพาห์
- สามารถแยกส่วนประกอบอินเฟส และส่วนประกอบควอดเรเจอร์ จากสัญญาณ QPSK ได้

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 12: การส่งบิตข้อมูลแบบ QAM (ตอนที่ 2/2)

- สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ QPSK
- สามารถจับคู่ระหว่างค่าบิตข้อมูล และค่าสัญญาณใน constellation diagram สำหรับสัญญาณ QAM
- สามารถบ่งบอกอัตราบิตของการส่งข้อมูลจาก constellation diagram และค่าสัญญาณได้

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 13: การมัลติเพล็กซ์แบบ TDMA และ FDMA

- สามารถแสดงสัญญาณจากผู้ใช้งานแต่ละคน สำหรับการมัลติเพล็กซ์แบบ TDMA
- สามารถแสดงสัญญาณจากผู้ใช้งานแต่ละคน สำหรับการมัลติเพล็กซ์แบบ FDMA
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยการมัลติเพล็กซ์แบบ TDMA
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยการมัลติเพล็กซ์แบบ FDMA

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 14: การมัลติเพล็กซ์แบบ CDMA

- สามารถเข้ารหัสและถอดรหัสค่าสัญญาณที่ใช้ในการมัลติเพล็กซ์แบบ CDMA
- สามารถแสดงสัญญาณจากผู้ใช้งานแต่ละคน สำหรับการมัลติเพล็กซ์แบบ CDMA
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยการมัลติเพล็กซ์แบบ CDMA

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 15: การเข้ารหัสตรวจสอบข้อผิดพลาด

- สามารถเข้ารหัสข้อมูลแบบ parity check ที่ตัวส่ง
- สามารถตรวจสอบข้อผิดพลาดจากบิตที่ได้รับ ตามรหัสแบบ parity check
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับ โดยมีการเข้ารหัสตรวจสอบข้อผิดพลาด

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 16: การเข้ารหัสแก้ไขข้อผิดพลาด

- สามารถเข้ารหัสข้อมูลแบบ Hamming ที่ตัวส่ง
- สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดจากบิตที่ได้รับ ตามรหัสแบบ Hamming
- สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับ โดยมีการเข้ารหัสแก้ไขข้อผิดพลาด

4.2.2 โปรแกรมจำลองผลการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (ซอฟต์แวร์)

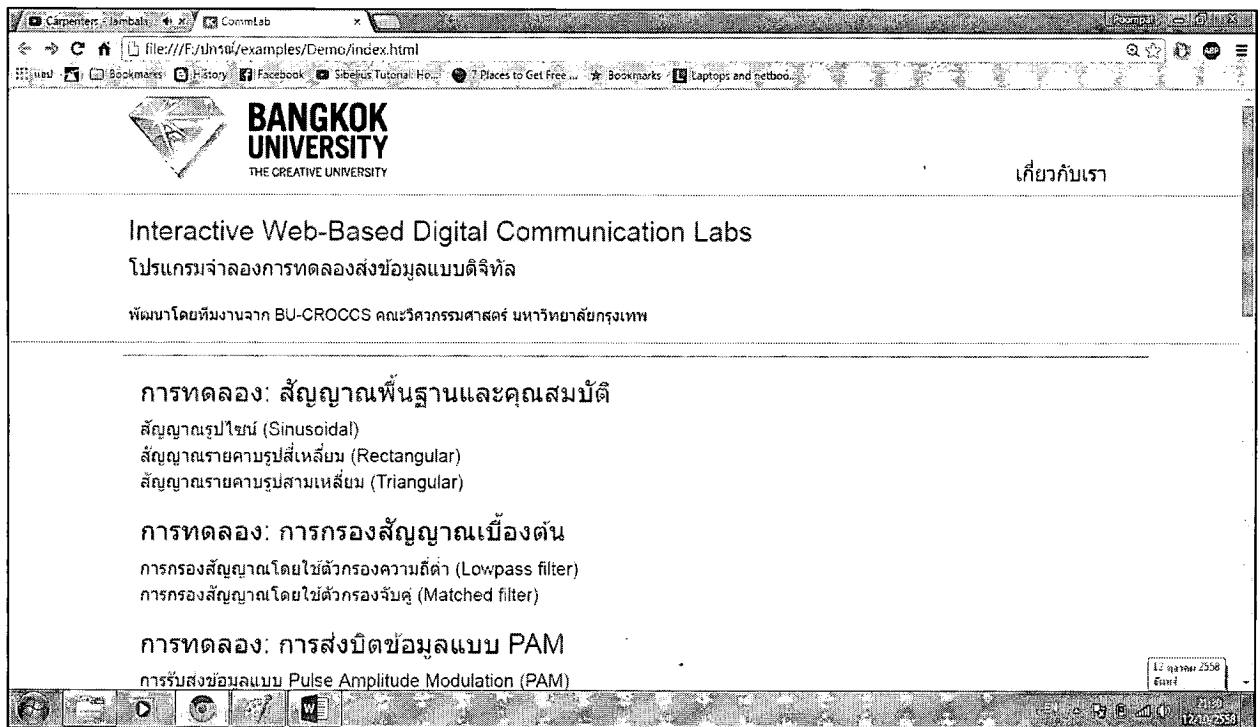
ในโครงการย่อยที่ 1 ทีมงานได้พัฒนาโปรแกรมจำลองผลการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โดยอิงตามเนื้อหาใน 16 กิจกรรมการเรียนรู้ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้ว โปรแกรมถูกพัฒนาขึ้นด้วยจาวาสคริปต์ (JavaScript) ทำให้สามารถเรียกใช้งานผ่านโปรแกรมเบราว์เซอร์ที่มีอยู่ทั่วไป เช่น Explorer Firefox และ Chrome โดยไม่ขึ้นกับระบบปฏิบัติการ เช่น Windows iOS และ Linux นอกจากนี้ ยังสามารถใช้งานได้จากคอมพิวเตอร์แบบพกพา เช่น tablet PC และ smart phone ทำให้สะดวกต่อการเรียนรู้ตามอัธยาศัยของนักศึกษาในสถานที่และในโอกาสต่าง ๆ อนึ่ง การพัฒนาโปรแกรมจำลองผลการทดลองเพื่อให้ใช้งานผ่านโปรแกรมนั้น ยังจะเอื้อให้นักศึกษาสามารถใช้โปรแกรมผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสำหรับการเรียนรู้ทางไกล (e-learning) อีกด้วย

การเข้าใช้งานโปรแกรม

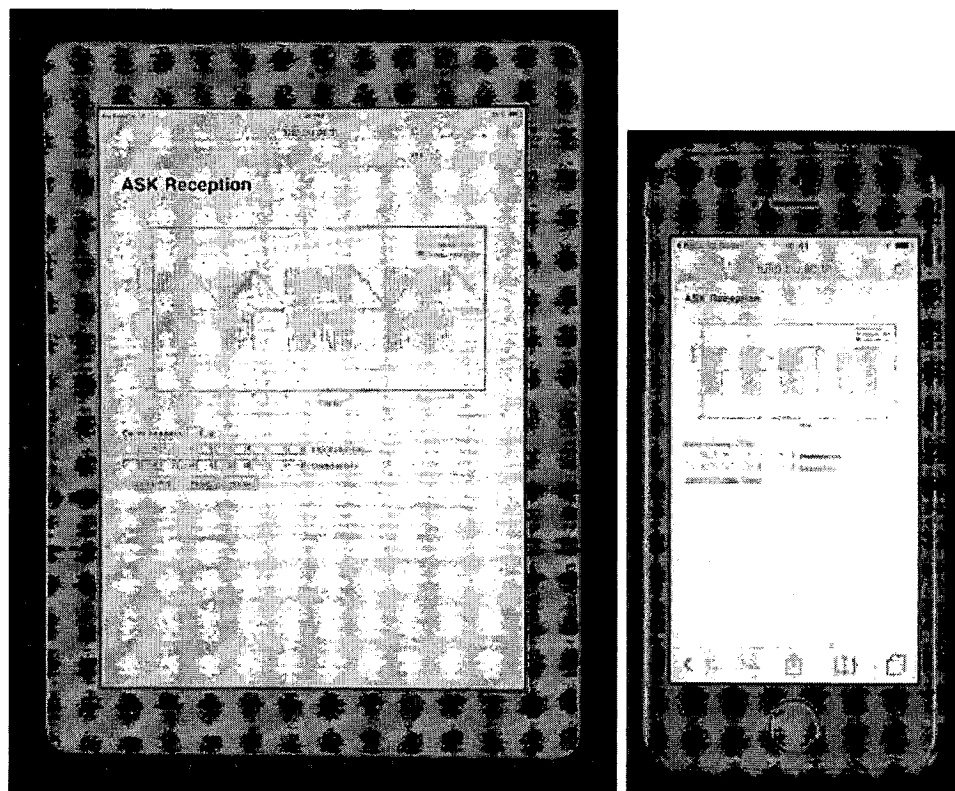
หลังจากคัดลอกไฟล์ทั้งหมดของโปรแกรมเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์แล้ว สามารถเริ่มใช้งานได้ทันทีโดยเปิดไฟล์ที่ชื่อ “main.html” ใน folder หลักของโปรแกรม ด้วยโปรแกรมเบราว์เซอร์ หลังจากเปิดโปรแกรมแล้ว จะเห็นหน้าต่างการใช้งานหลักดังแสดงในรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 เป็นการเรียกใช้โปรแกรมผ่านเบราว์เซอร์ Chrome ในระบบปฏิบัติการ Windows นอกจากการเรียกใช้โปรแกรมจากไฟล์ของโปรแกรมซึ่งถูกจัดเก็บในฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ นักศึกษายังสามารถเรียกใช้โปรแกรมจากไฟล์ที่ถูกจัดเก็บในเครื่องคอมพิวเตอร์ server ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ทำให้สามารถประยุกต์ใช้โปรแกรมสำหรับการศึกษาทางไกล (e-learning) ผ่านอินเทอร์เน็ต

รูปที่ 4.2 เป็นการใช้โปรแกรมผ่านอุปกรณ์พกพาประเภท tablet PC และ smart phone เพื่อความสะดวกต่อการใช้งานของนักศึกษาในสถานที่ต่าง ๆ นอกเหนือจากผ่านคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ



รูปที่ 4.1: หน้าต่างการใช้งานหลักของโปรแกรมจำลองผลการทดลองการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล ผู้ใช้งานสามารถกดเลือกหัวข้อที่สนใจเพื่อเปิดหน้าต่างสำหรับการทดลองสำหรับหัวข้อนั้น ๆ



รูปที่ 4.2: การเรียกใช้โปรแกรมจำลองผลการทดลองผ่านอุปกรณ์พกพาประเภท tablet PC และ smart phone

ตัวอย่างการจำลองผลการทดลองของโปรแกรม

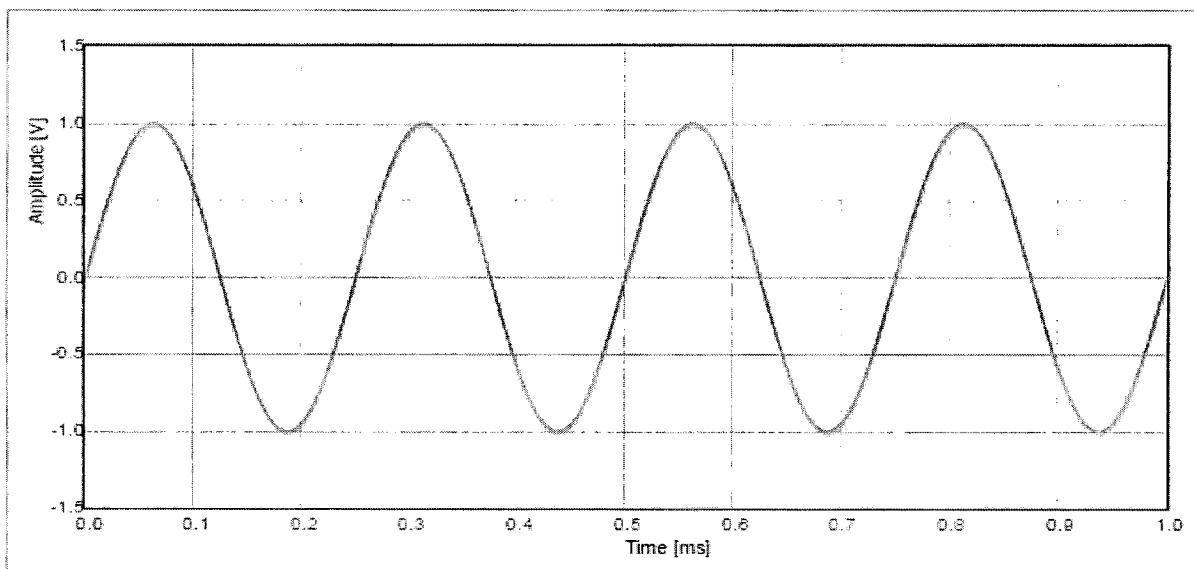
การทดลอง: สัญญาณพื้นฐานและคุณสมบัติ

รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณไซน์จากหน้าต่างการใช้งานของการทดลองในกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 2 โดยนักศึกษาสามารถปรับเปลี่ยนค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้และเห็นผลกระทบต่อรูปสัญญาณ

- แอมพลิจูด (amplitude) มีหน่วยเป็น V
- ค่า DC offset มีหน่วยเป็น V
- ความถี่ (frequency) มีหน่วยเป็น kHz
- เฟส (phase) มีหน่วยเป็น degree
- ระยะเวลา (duration) มีหน่วยเป็น ms

สัญญาณรูปไซน์

สัญญาณรูปไซน์เป็นสัญญาณรายคาบที่มีองค์ประกอบความถี่เดียว สามารถบ่งบอกลักษณะได้ด้วยค่าแอมพลิจูด ความถี่ และเฟส



: แอมพลิจูด (Amplitude) [V]
: ค่า DC offset [V]
: ความถี่ (Frequency) [kHz]
: เฟส (Phase) [degree]
: ระยะเวลา (Duration) [ms]

รูปที่ 4.3: สัญญาณรูปไซน์ที่เกิดขึ้นและปรับเปลี่ยนคุณสมบัติได้ในการทดลอง

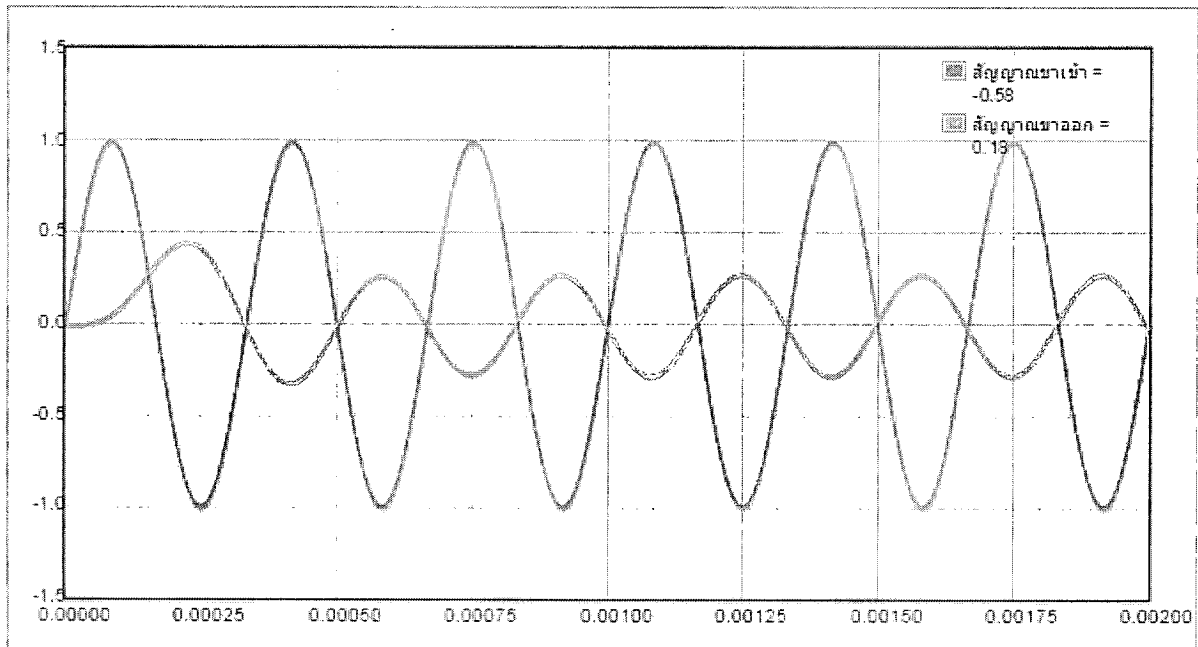
การทดลอง: การกรองสัญญาณเบื้องต้น

รูปที่ 4.4 แสดงผลของการทดลองกรองสัญญาณไซน์ด้วยตัวกรองความถี่ต่ำ (lowpass filter) ที่มี cut-off frequency เท่ากับ 2 kHz สำหรับกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 3 ในรูปที่ 4.4 สัญญาณขาเข้ามีความถี่ 3 kHz นักศึกษาสามารถปรับความถี่ของสัญญาณขาเข้าและเห็นผลกระทบของการกรองสัญญาณด้วยตัวกรองความถี่ต่ำ

ตัวกรองความถี่ต่ำ

ตัวกรองความถี่ต่ำ (Lowpass filter) เป็นตัวกรองสัญญาณที่ใช้กรององค์ประกอบความถี่ที่สูงกว่า Cut-off frequency ของสัญญาณขาเข้าออกไป

หมายเหตุ: แกนตั้งแสดงค่าแอมพลิจูด [V], แกนนอนแสดงค่าเวลา [s]



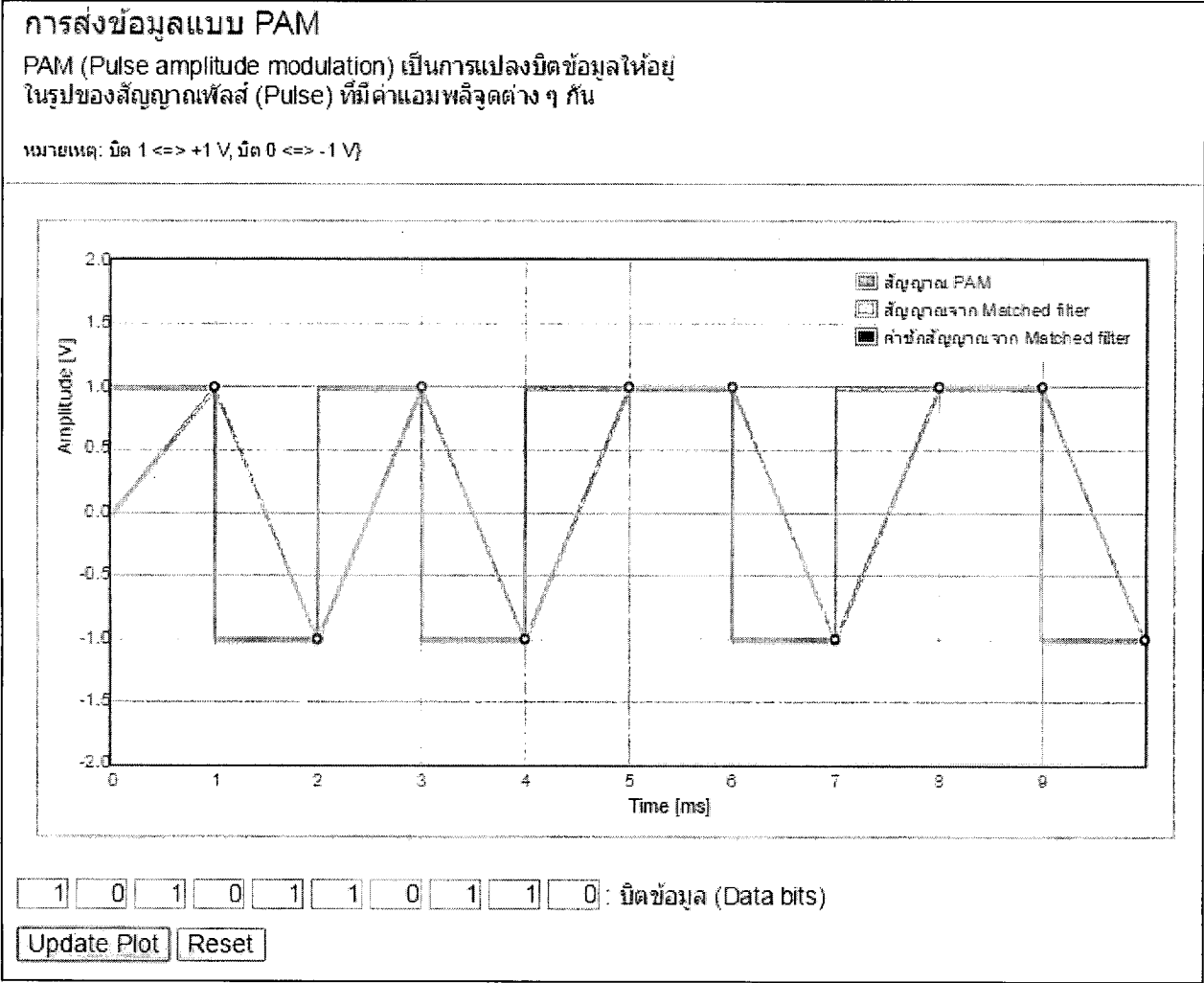
กดเลือกความถี่ของสัญญาณรูปไซน์ขาเข้า (ตัวกรองความถี่ต่ำมี Cut-off frequency = 2 kHz)

รูปที่ 4.4: สัญญาณไซน์ขาเข้าและขาออกสำหรับตัวกรองความถี่ต่ำที่มี cut-off frequency อยู่ที่ 2 kHz ในการทดลอง โดยสัญญาณขาเข้าในรูปมีความถี่ 3 kHz ทำให้สัญญาณขาออกมีแอมพลิจูดต่ำกว่าของสัญญาณขาเข้า เนื่องจากความถี่ใด ๆ ที่สูงกว่า 2 kHz จะถูกกรองออก

การทดลอง: การส่งบิตข้อมูลแบบ PAM

รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณข้อมูลของการส่งบิตข้อมูลจำนวน 10 บิตโดยใช้สัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมและการมอดูเลตแบบ PAM (pulse amplitude modulation) สำหรับกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 5 ซึ่งค่าของสัญญาณในแต่ละคาบบิตจะมีค่าสูงสำหรับบิต 1 และจะมีค่าต่ำสำหรับบิต 0 ในรูปบิตข้อมูลคือ 1010110110 ในขณะที่รูปสัญญาณข้อมูลจะประกอบด้วยสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม รูปสัญญาณขาออกจากตัวกรองจับคู่ (matched filter) ที่ตัวรับจะประกอบด้วยสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

นักศึกษาสามารถเปลี่ยนบิตข้อมูล (แสดงในช่องใส่ข้อมูลจำนวน 10 ช่อง) และเห็นความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณข้อมูลที่ถูกส่ง และสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของตัวรับ

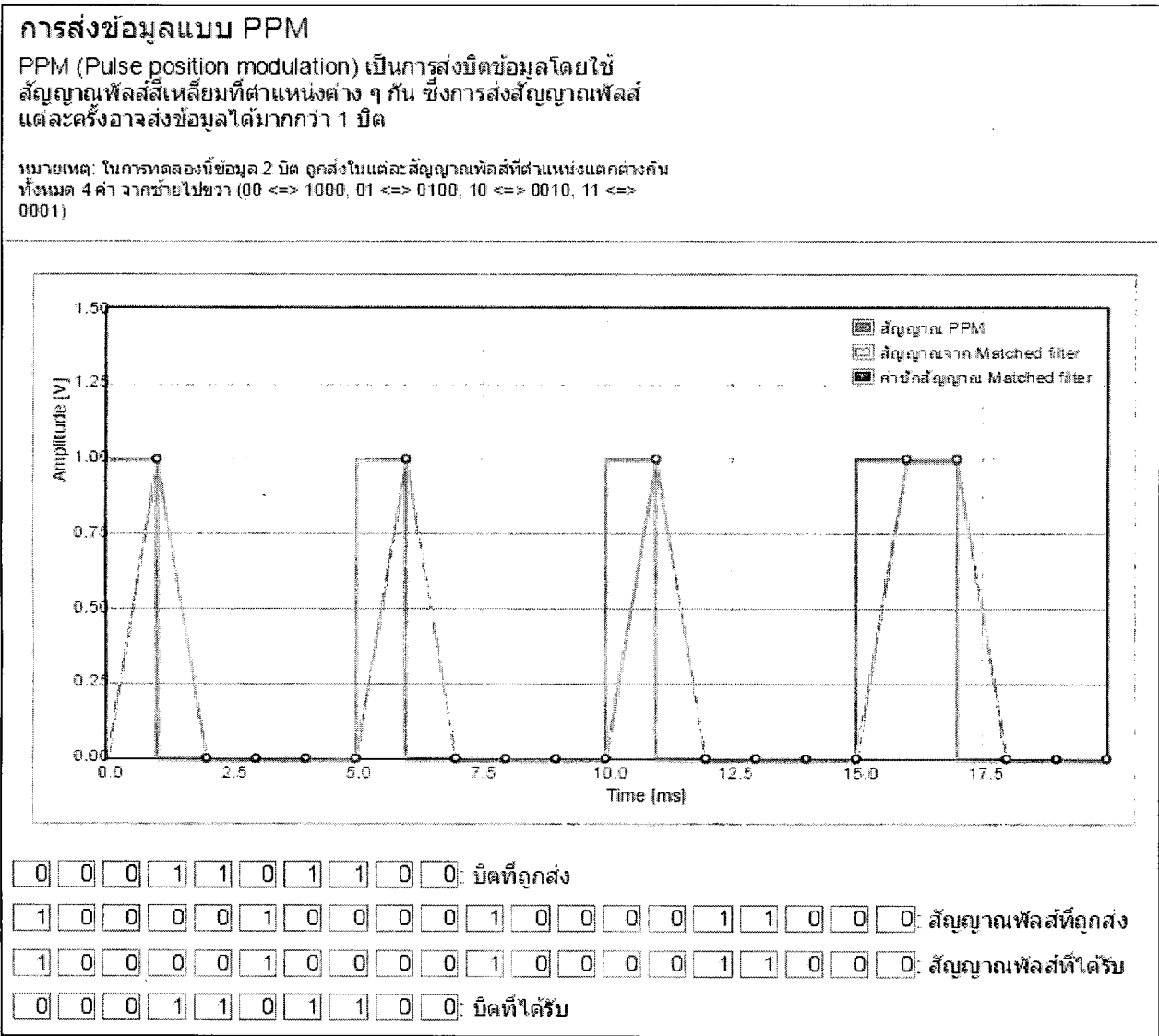


รูปที่ 4.5: สัญญาณข้อมูลแบบ PAM ที่สังเกตและปรับเปลี่ยนได้ตามบิตข้อมูลในกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 5

การทดลอง: การส่งบิตข้อมูลแบบ PPM

รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณข้อมูลของการส่งบิตข้อมูลจำนวน 10 บิตด้วยการมอดูเลตแบบ PPM (pulse position modulation) สำหรับกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 7 โดยค่าของสัญญาณในแต่ละคาบของ symbol จะถูกแบ่งออกเป็น 4 ช่วง โดยสัญญาณจะมีค่าสูงในตำแหน่งที่ 1 2 3 หรือ 4 ขึ้นอยู่กับบิตข้อมูล 2 บิตสำหรับ symbol นั้น ๆ

ในรูป ค่าของบิตที่ถูกส่งคือ 00 01 10 11 00 ซึ่งนักศึกษาสามารถเปลี่ยนค่าของบิตและสังเกตความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ นอกจากนี้ ยังมีการแสดงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของตัวรับ เพื่อให้นักศึกษาสามารถเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ถูกส่งอีกด้วย

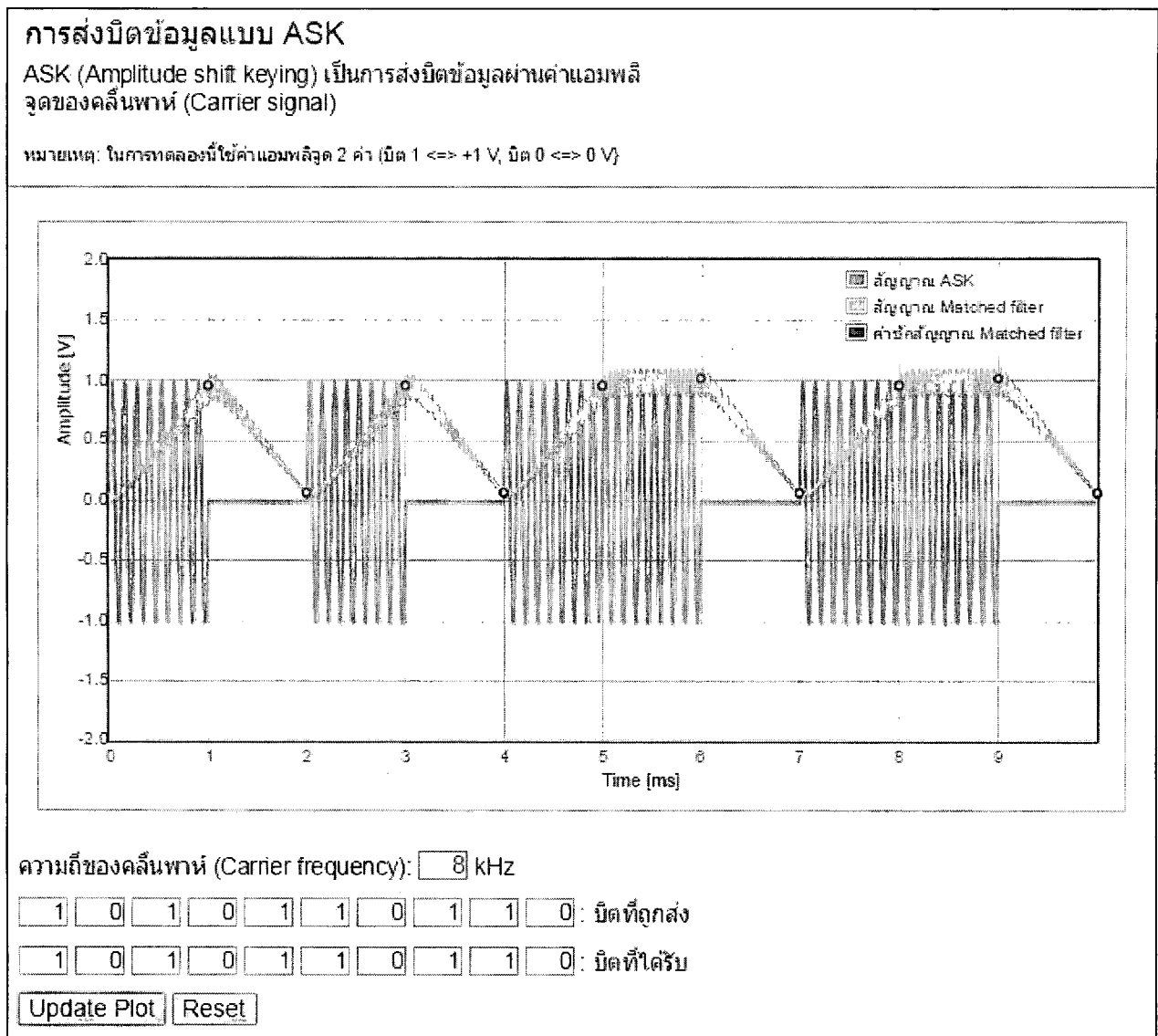


รูปที่ 4.6: สัญญาณข้อมูลแบบ PPM ที่สังเกตและปรับเปลี่ยนได้ตามบิตข้อมูลในกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 7

การทดลอง: การส่งบิตข้อมูลแบบ ASK

รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณข้อมูลของการส่งบิตข้อมูลจำนวน 10 บิตด้วยการมอดูเลตแบบ ASK (amplitude shift keying) โดยค่าของสัญญาณในแต่ละคาบบิตจะไม่เป็นศูนย์สำหรับบิต 1 และจะเป็นศูนย์สำหรับบิต 0 ซึ่งการทดลองนี้ใช้ประกอบกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 8

ในรูป ค่าของบิตที่ถูกส่งคือ 1010110110 ซึ่งนักศึกษาสามารถเปลี่ยนค่าของบิตและสังเกตความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ นอกจากนี้ ยังมีการแสดงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของตัวรับเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ถูกส่ง นักศึกษายังสามารถเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห้ได้อีกด้วย

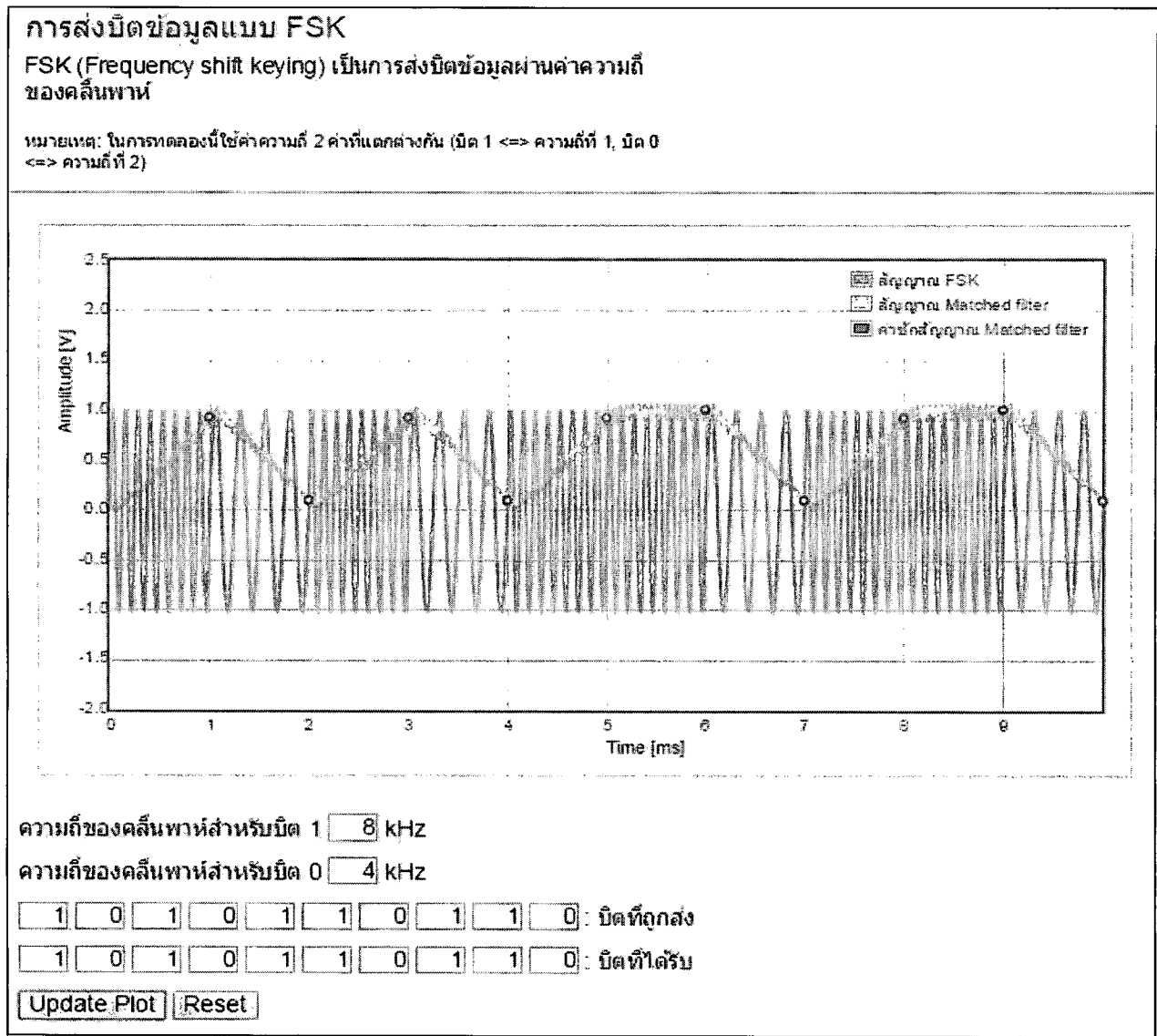


รูปที่ 4.7: สัญญาณข้อมูลแบบ ASK ที่สังเกตและปรับเปลี่ยนได้ตามบิตข้อมูลในกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 8

การทดลอง: การส่งบิตข้อมูลแบบ FSK

รูปที่ 4.8 แสดงสัญญาณข้อมูลของการส่งบิตข้อมูลจำนวน 10 บิตด้วยการมอดูเลตแบบ FSK (frequency shift keying) สำหรับกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 9 โดยสัญญาณในแต่ละคาบบิตจะเป็นคลื่นพาห์ความถี่สูงสำหรับบิต 1 และจะเป็นคลื่นพาห์ความถี่ต่ำสำหรับบิต 0

ในรูป ค่าของบิตที่ถูกส่งคือ 1010110110 ซึ่งนักศึกษาสามารถเปลี่ยนค่าของบิตและสังเกตความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ นอกจากนี้ ยังมีการแสดงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของตัวรับ เพื่อการเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ถูกส่ง นักศึกษายังสามารถเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห์ทั้งสองค่า (สูงและต่ำ) ได้อีกด้วย

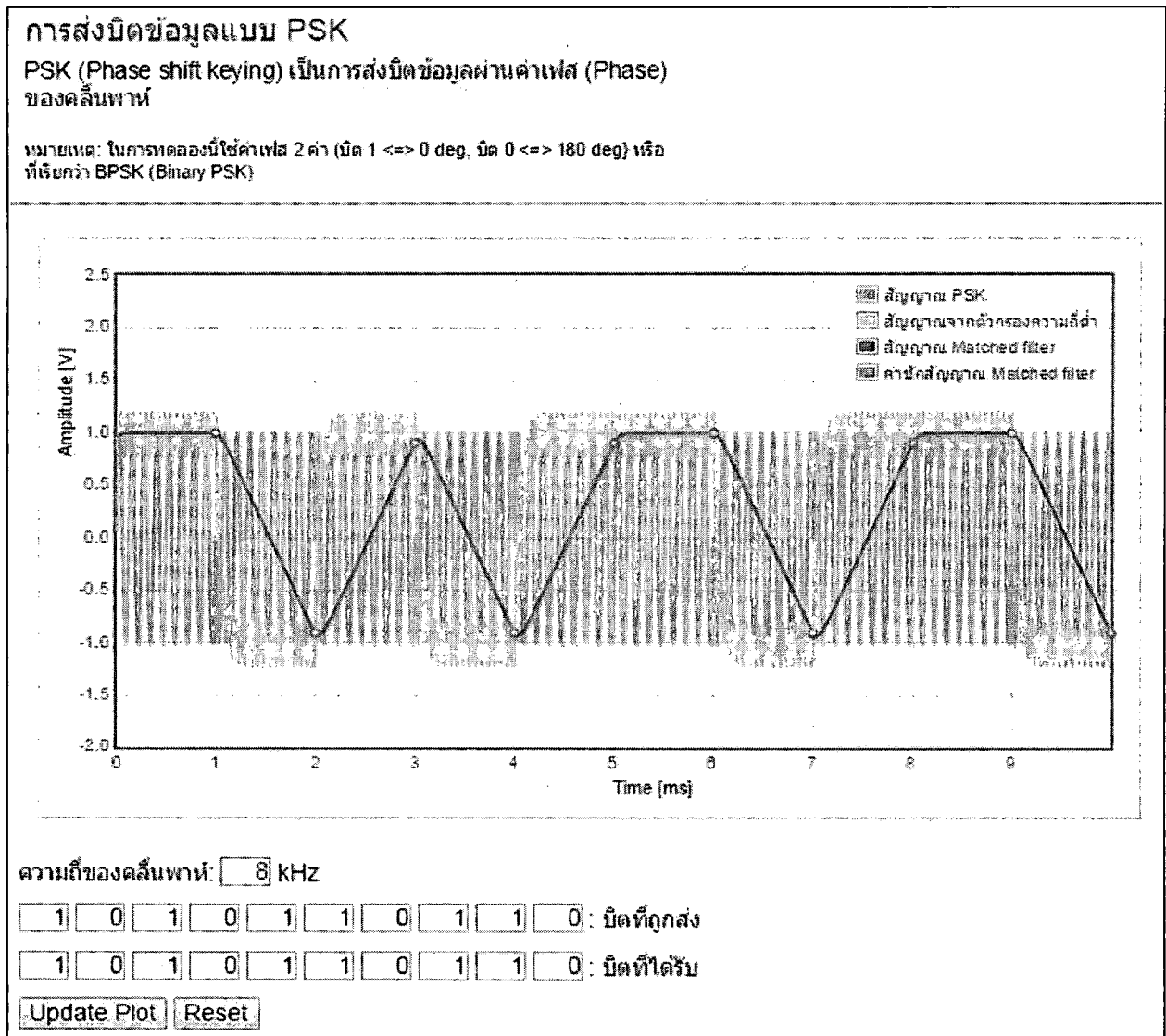


รูปที่ 4.8: สัญญาณข้อมูลแบบ FSK ที่สังเกตและปรับเปลี่ยนได้ตามบิตข้อมูลในกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 9

การทดลอง: การส่งบิตข้อมูลแบบ PSK

รูปที่ 4.9 แสดงสัญญาณข้อมูลของการส่งบิตข้อมูลจำนวน 10 บิตด้วยการมอดูเลตแบบ PSK (phase shift keying) สำหรับกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 10 โดยสัญญาณในแต่ละคาบบิตจะเป็นคลื่นพาห์ที่เริ่มต้นด้วยค่าเฟส 0° สำหรับบิต 1 และด้วยค่าเฟส 180° สำหรับบิต 0

ในรูป ค่าของบิตที่ถูกส่งคือ 1010110110 ซึ่งนักศึกษาสามารถเปลี่ยนค่าของบิตและสังเกตความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ นอกจากนี้ ยังมีการแสดงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของตัวรับเพื่อการเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ถูกส่ง นักศึกษายังสามารถเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห์ได้อีกด้วย

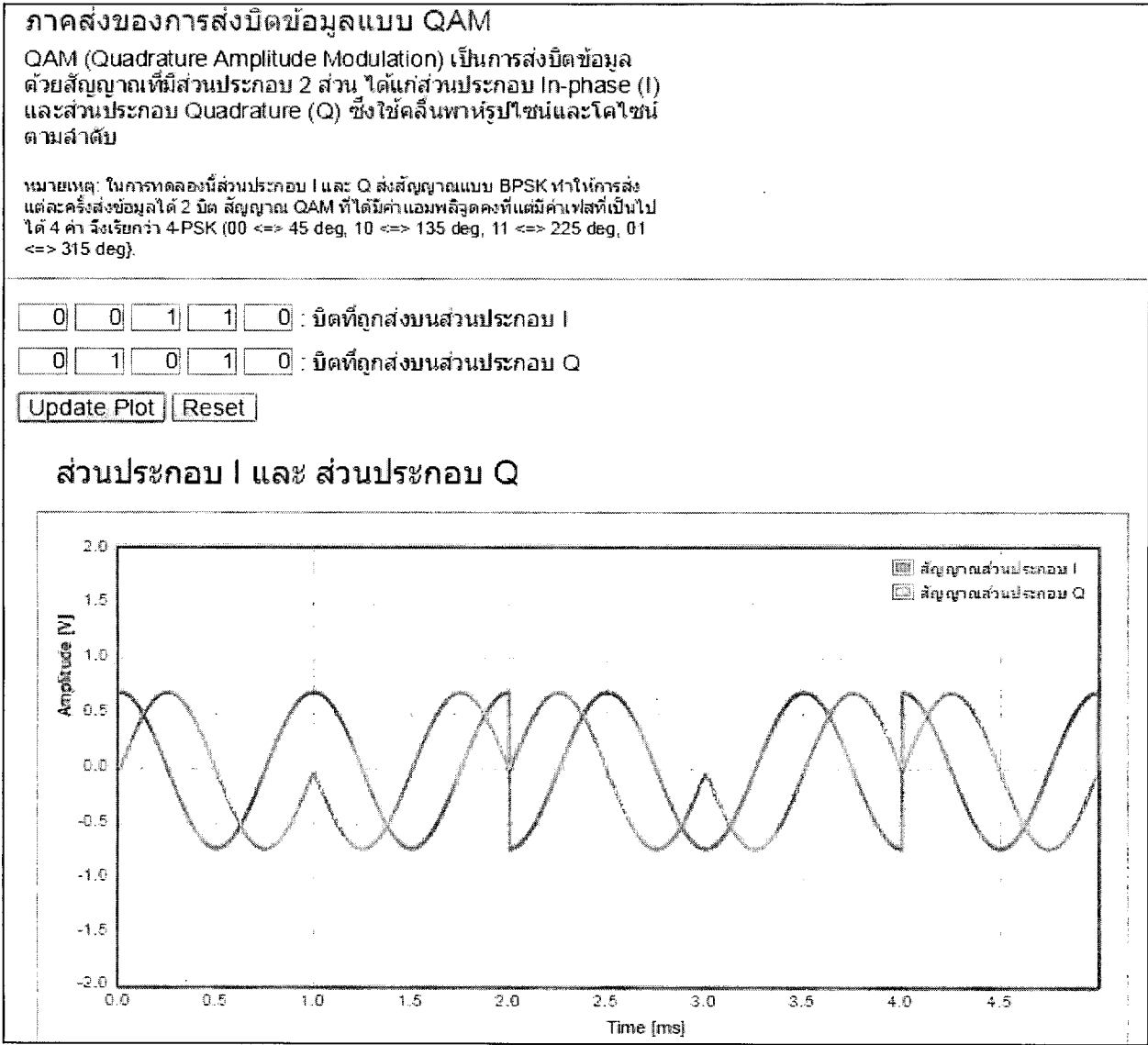


รูปที่ 4.9: สัญญาณข้อมูลแบบ PSK ที่สังเกตและปรับเปลี่ยนได้ตามบิตข้อมูลในกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 10

การทดลอง: การส่งบิตข้อมูลแบบ QAM

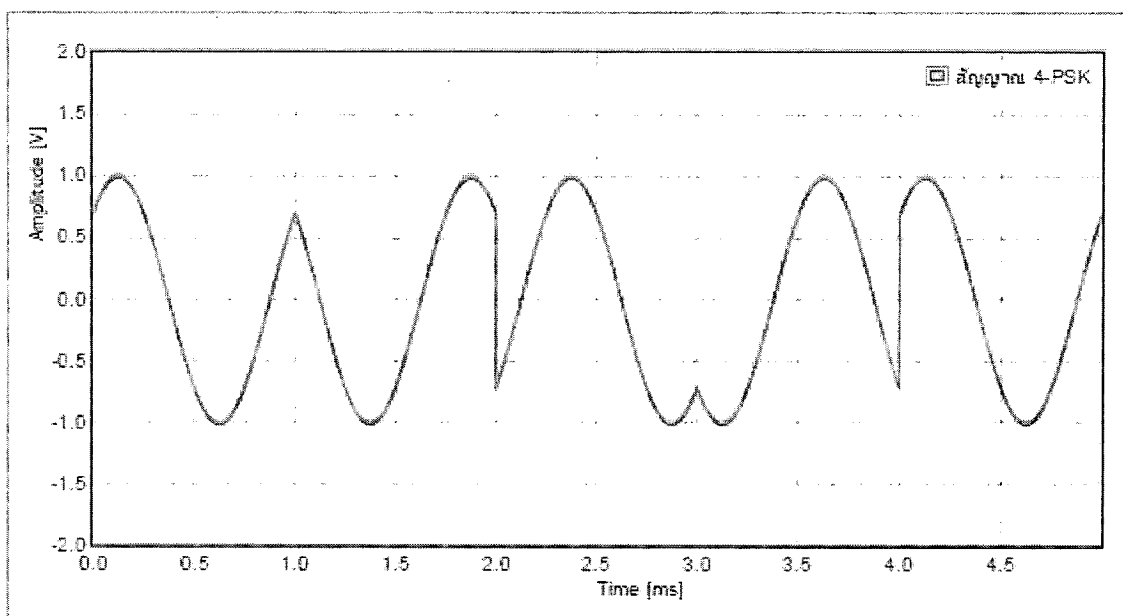
รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงสัญญาณข้อมูลของการส่งบิตข้อมูลจำนวน 10 บิตด้วยการมอดูเลตแบบ QAM (quadrature amplitude modulation) ในกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 12 โดยแต่ละ symbol จะมีค่าสัญญาณที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4 แบบขึ้นอยู่กับบิตข้อมูล 2 บิต การส่งแบบ QAM ในกรณีนี้เรียกว่า QPSK (quadrature PSK)

ในรูป ค่าของบิตที่ถูกส่งคือ 00 01 10 11 00 โดยบิตแรกในแต่ละคู่เป็นส่วนประกอบ in-phase และบิตหลังในแต่ละคู่คือส่วนประกอบ quadrature ซึ่งนักศึกษาสามารถเปลี่ยนค่าของบิตและสังเกตความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ สัญญาณข้อมูล QAM เป็นผลบวกของส่วนประกอบสองส่วนนี้

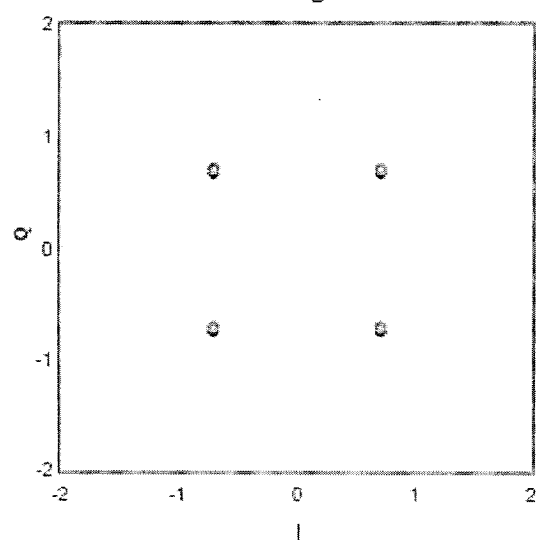


รูปที่ 4.10: ส่วนประกอบ in-phase และส่วนประกอบ quadrature ของสัญญาณข้อมูลแบบ QPSK

สัญญาณ QAM (กรณี 4-PSK)



Constellation diagram



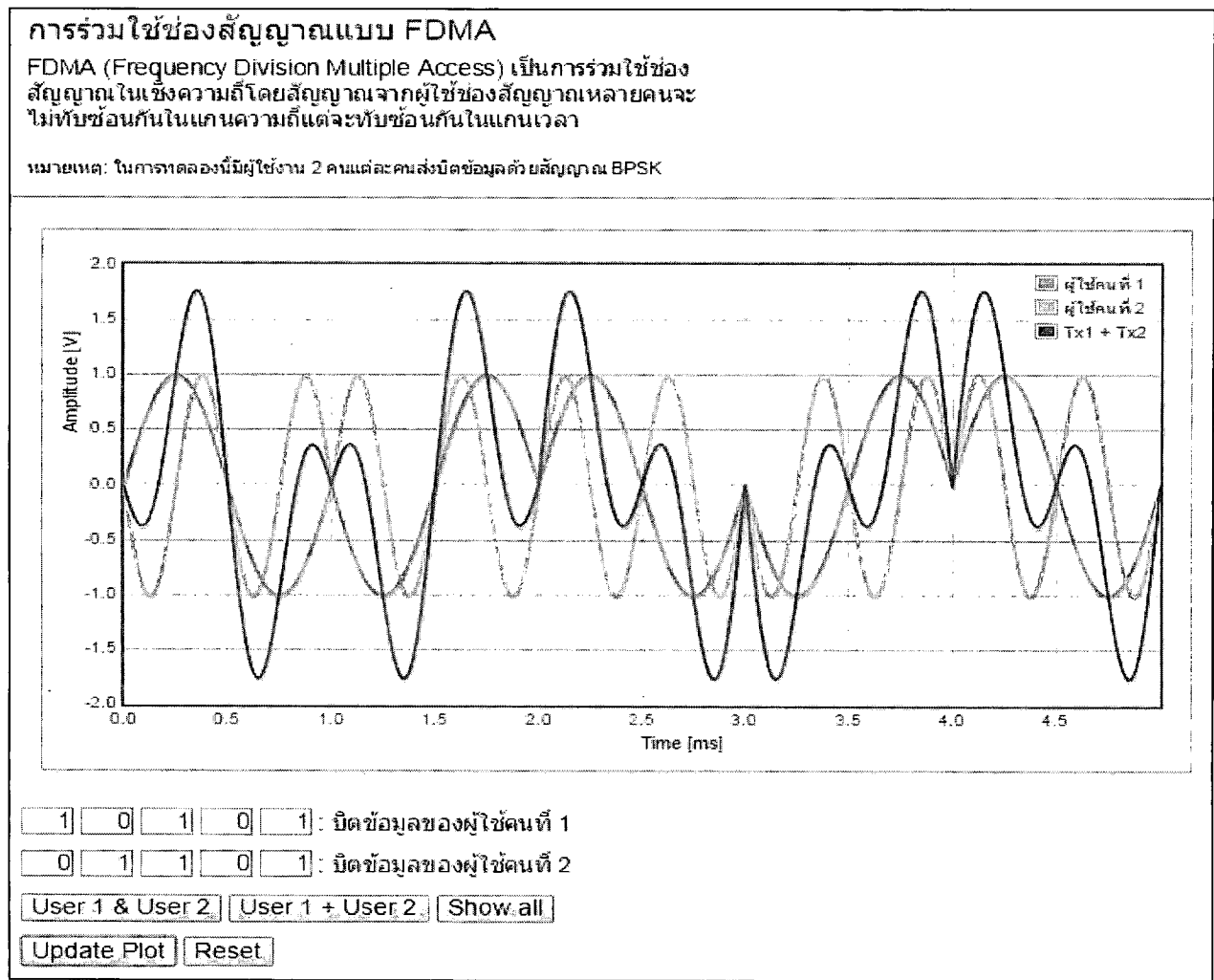
Copyright © 2014 - 2015 School of Engineering, Bangkok University

รูปที่ 4.11: สัญญาณข้อมูลแบบ QPSK ที่สังเกตและปรับเปลี่ยนได้ตามบิตข้อมูลในกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 12

การทดลอง: การมัลติเพล็กซ์แบบ FDM

รูปที่ 4.12 แสดงสัญญาณข้อมูลของการส่งบิตข้อมูลจำนวน 10 บิต จากผู้ใช้งาน 2 คน (คนละ 5 บิต) ด้วยวิธีการมัลติเพล็กซ์แบบ FDM (frequency division multiplexing) หรือ FDMA (frequency division multiple access) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการมัลติเพล็กซ์ที่สำคัญ นักศึกษายังสามารถเลือกดูวิธีมัลติเพล็กซ์แบบอื่น ๆ อีก ได้แก่ TDM (time division multiplexing) และ CDM (code division multiplexing) ซึ่งไม่ได้นำมาแสดงในที่นี้

ในรูป ค่าของบิตที่ถูกส่งคือ 10101 จากคนแรก และ 01101 จากคนที่สอง โดยสัญญาณข้อมูลของคนแรกใช้คลื่นพาห์ความถี่สูง และสัญญาณข้อมูลของคนที่สองใช้คลื่นพาห์ความถี่ต่ำ นักศึกษาสามารถเปลี่ยนค่าของบิตข้อมูลและสังเกตความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ สัญญาณข้อมูลรวมเป็นผลบวกของสัญญาณข้อมูลของแต่ละคน



รูปที่ 4.12: สัญญาณข้อมูลจากการมัลติเพล็กซ์แบบ FDM ที่สังเกตและปรับเปลี่ยนได้ตามบิตข้อมูล

ในกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 13

การทดลอง: การแก้ไขข้อผิดพลาดด้วยรหัส Hamming

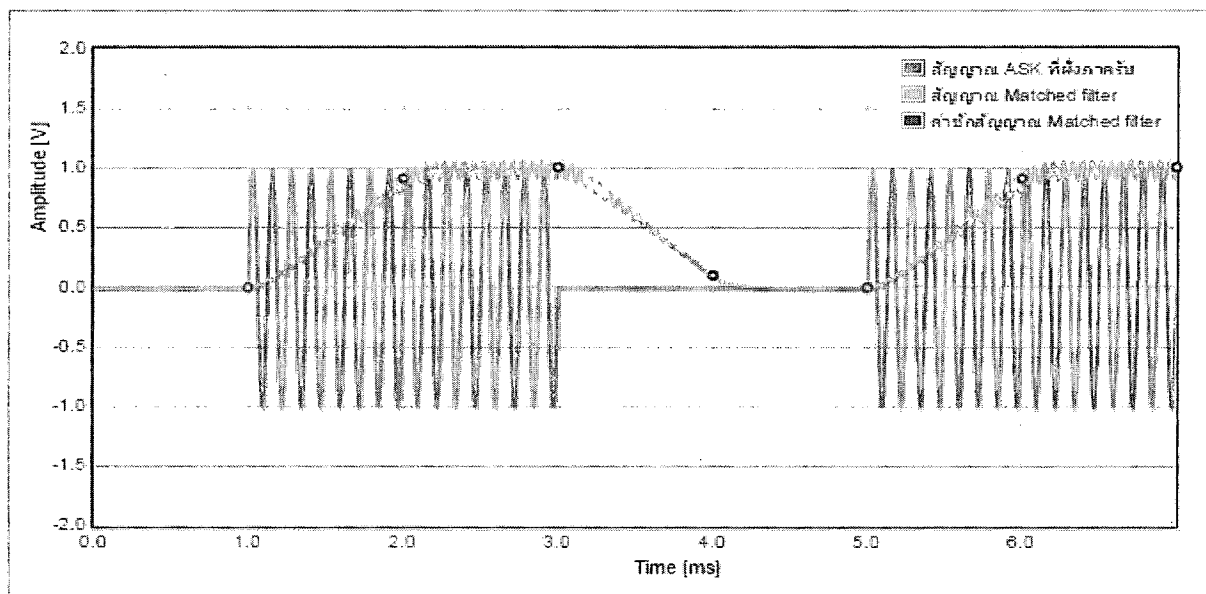
รูปที่ 4.13 แสดงการส่งสัญญาณข้อมูลหลังการเข้ารหัสบิตข้อมูลจำนวน 4 บิตด้วยรหัส Hamming (7,4) ซึ่งเป็นรหัสยาว 7 บิตจากบิตข้อมูลยาว 4 บิต นศ. ยังสามารถเลือกใช้รหัสอื่น ๆ ได้แก่ รหัส parity check ซึ่งไม่ได้แสดงในที่นี้

ในรูป ค่าของบิตที่จะถูกเข้ารหัสคือ 1011 และค่าของบิตที่จะถูกถอดรหัสคือ 0110011 นศ. สามารถเปลี่ยนค่าของบิตและสังเกตความเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์การเข้ารหัสและถอดรหัสได้

การแก้ไขข้อผิดพลาดด้วยรหัส Hamming

รหัส Hamming ถูกนำมาใช้เข้ารหัสบิตข้อมูลเพื่อแก้ไขบิตที่ผิดพลาด (Error correction) ที่เกิดขึ้นจากช่องสัญญาณ โดยสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ 1 บิต

หมายเหตุ: ในการทดลองนี้บิตข้อมูลถูกเข้ารหัส Hamming ที่ละ 4 บิตเพื่อให้ได้รหัสที่มีความยาว 7 บิต จากนั้นข้อมูลที่เข้ารหัสแล้วจะถูกส่งแบบ ASK



ความถี่คลื่นพาหะ: KHz

: บิตข้อมูล

: บิตข้อมูลหลังเข้ารหัส

: บิตข้อผิดพลาด

: บิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสที่ได้รับ

: บิตข้อมูลหลังถอดรหัส

Syndrome (บอกตำแหน่งของข้อผิดพลาด): (เลขฐานสอง) =

รูปที่ 4.13: การส่งข้อมูลแบบมีการเข้ารหัส Hamming (7,4) ในกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 16

4.2.3 ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (ฮาร์ดแวร์)

ในโครงการย่อยที่ 2 ทีมงานผลิตชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลสำหรับการเรียนการสอนวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล โดยการพัฒนาชุดทดลองใช้แนวทางการสร้างระบบประเภทกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (software defined) ซึ่งมีข้อดี คือสามารถใช้อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ชุดเดียวกันในการทำหน้าที่หลาย ๆ อย่างสำหรับหลายการทดลอง โดยนักศึกษาผู้ใช้ชุดทดลองจะเลือกใช้โปรแกรมกำหนดหน้าที่ (ซอฟต์แวร์) จากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับชุดทดลองผ่านสาย USB เพื่อกำหนดหน้าที่ของชุดทดลองให้เหมาะสมกับหัวข้อกิจกรรมสำหรับการทดลองที่สนใจ สำหรับคู่มือกิจกรรมการเรียนรู้โดยใช้ชุดทดลองนั้น ได้แนบมาพร้อมกับรายงานฉบับนี้

จุดเด่นของชุดทดลองที่ถูกพัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้ คือการใช้งานเชิงปฏิสัมพันธ์ (interactive) โดยนักศึกษาสามารถกำหนดบิตข้อมูลที่ถูกส่งได้เองและเห็นผลกระทบต่อสัญญาณข้อมูลได้แบบทันทีทันใด ซึ่งที่ผ่านมาชุดทดลองสำเร็จรูปไม่มีการใช้งานในลักษณะนี้ [3, 4, 5, 6, 7] จากจุดเด่นนี้เอง ทีมงานสามารถยื่นขอจดอนุสิทธิบัตรเรื่อง “ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลเชิงปฏิสัมพันธ์เพื่อศึกษาการสื่อสารแบบดิจิทัล” ต่อกกรมทรัพย์สินทางปัญญา เมื่อวันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2558 หมายเลขคำขอ 1503001964 โดยหน้าแรกของเอกสารคำขอ อยู่ในเอกสารแนบ ง

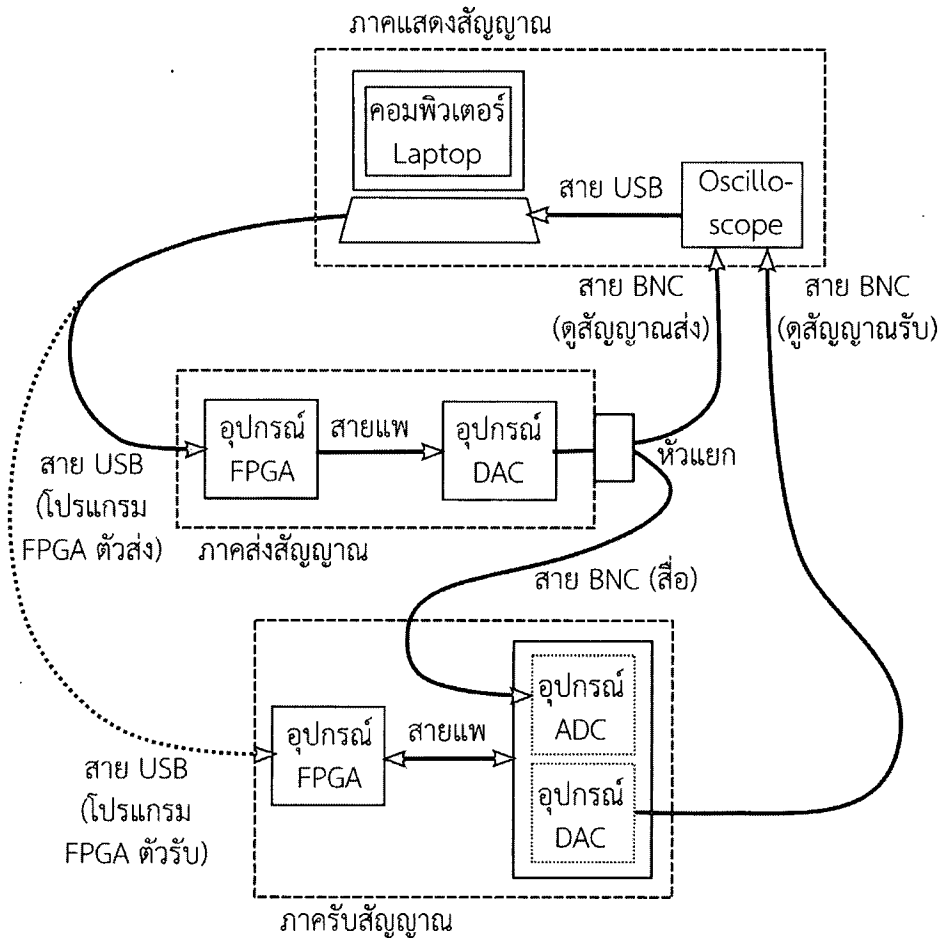
รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างของชุดทดลองที่ทีมงานได้พัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้ ส่วนประกอบของชุดทดลองที่ทีมงานพัฒนาขึ้นเองมีดังต่อไปนี้

- อุปกรณ์ดีเอสซี และอุปกรณ์เอตีสซี
- อัลกอริทึมและโปรแกรมประมวลสัญญาณดิจิทัลของอุปกรณ์เอฟพีจีเอ ซึ่งเขียนด้วยภาษา Verilog

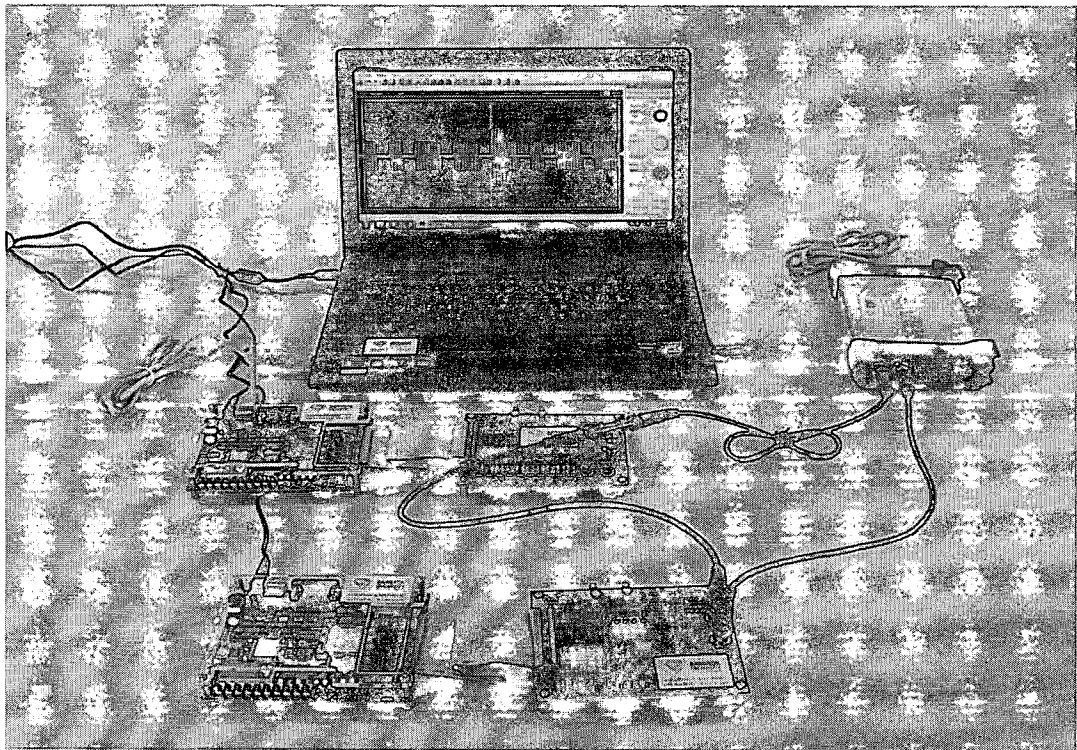
สำหรับอุปกรณ์ที่จัดซื้อจากภายนอกห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ประกอบชุดทดลอง มีดังต่อไปนี้

- แล็บท็อปคอมพิวเตอร์
- อุปกรณ์เอฟพีจีเอของบริษัท Altera ซึ่งอยู่บน development board รุ่น DE0 ของบริษัท Terasic
- ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) แบบต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ทางสาย USB ของบริษัท Hantek
- สายโคแอก (หัวต่อแบบ BNC) สำหรับส่งสัญญาณข้อมูล และหัวแยกสัญญาณสำหรับสายโคแอก
- สายแพ (ribbon cable) สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ดีเอสซี และอุปกรณ์เอตีสซี เข้ากับอุปกรณ์เอฟพีจีเอ

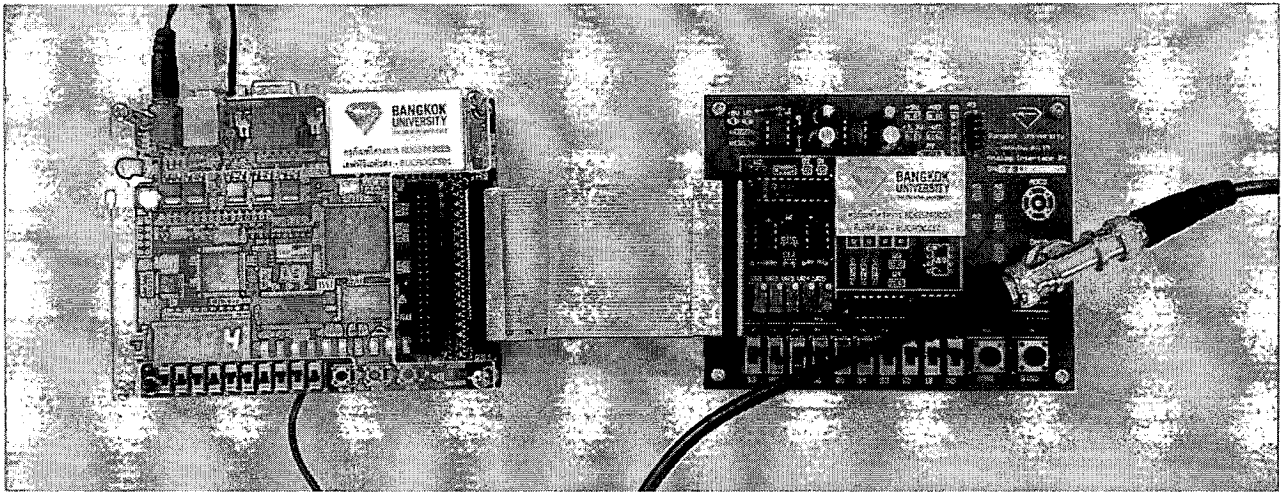
รูปที่ 4.15 แสดงชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลที่ทีมงานได้พัฒนาขึ้นในโครงการนี้ รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงตัวส่งและตัวรับในระยะใกล้ อุปกรณ์ที่ต้องเสียบบล็อกไฟ ได้แก่เอฟพีจีเอ 2 ตัว และแล็บท็อปคอมพิวเตอร์ (ในกรณีที่ไม่ใช่แบบเดสก์)



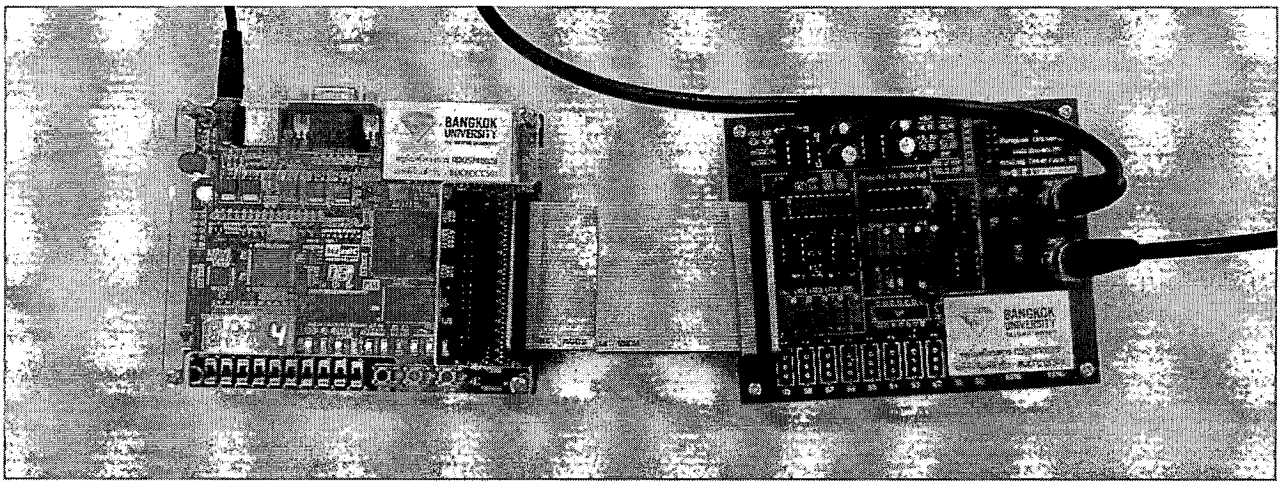
รูปที่ 4.14: โครงสร้างของชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยทีมงาน



รูปที่ 4.15: ต้นแบบชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีตำแหน่งอุปกรณ์เหมือนในรูปที่ 2



รูปที่ 4.16: ตัวส่งในชุดทดลอง อุปกรณ์ดีเอซีที่ทีมงานได้พัฒนาขึ้นอยู่ทางขวามือ



รูปที่ 4.17: ตัวรับในชุดทดลอง อุปกรณ์เอดีซีและดีเอซีที่ทีมงานพัฒนาขึ้นอยู่ทางขวามือ

ตารางที่ 4.1 แสดงรายชื่อและจำนวนอุปกรณ์ทั้งหมดในชุดทดลอง ส่วนค่าคุณสมบัติหลักต่าง ๆ ของชุดทดลอง อยู่ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1: รายชื่อและจำนวนอุปกรณ์ในชุดทดลอง

อุปกรณ์	จำนวน
คอมพิวเตอร์ Laptop (พร้อมสายไฟและหม้อแปลง)	1
Oscilloscope ชนิดต่อกับคอมพิวเตอร์	1
FPGA (พร้อมสายไฟ)	2
อุปกรณ์ DAC สำหรับตัวส่ง	1
อุปกรณ์ ADC+DAC สำหรับตัวรับ	1
สายแพ (Ribbon)	2
สาย USB	2
สาย BNC	3
หัวแยกสาย BNC	1

ตารางที่ 4.2: ค่าคุณสมบัติหลักต่าง ๆ ของชุดทดลอง

คุณสมบัติ	ค่า
อัตราบิต (bit rate)	1–10 กิโลบิตต่อวินาที (kbps)
ความถี่ของคลื่นพาห์ (carrier signal frequency)	1–5 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)
จำนวนบิตต่อค่าสัญญาณดิจิทัล (quantization bits)	10 บิตต่อค่า
อัตราสุ่มค่าสัญญาณดิจิทัล (sampling frequency)	100 กิโลเฮิร์ตซ์
รูปร่างของสัญญาณพัลส์ (pulse shape)	สี่เหลี่ยม (rectangular)
รูปแบบการมอดูเลต (modulation format)	PAM, PWM, PPM, ASK, FSK, PSK, QPSK
วิธีการมัลติเพล็กซ์สัญญาณ (multiplexing method)	TDM, FDM, CDM

ถึงแม้ว่าชุดทดลองที่ทีมงานได้พัฒนาขึ้น จะมีข้อจำกัดอยู่ในเรื่องของอัตราบิตและความถี่ของคลื่นพาห ซึ่งอยู่ในระดับ 1–10 กิโลบิตต่อวินาที และในระดับ 1–5 กิโลเฮิร์ตซ ตามลำดับ แต่เนื่องจากหลักการทำงานของ การส่ง การรับ และการประมวลผลสัญญาณที่เกี่ยวข้องนั้นเป็นหลักการทำงานเดียวกันกับระบบที่มีอัตราบิตและความถี่ ของคลื่นพาหที่สูงกว่า จึงไม่จัดเป็นข้อจำกัดที่มีผลต่อการเรียนการสอนพื้นฐานแต่อย่างใด

การพัฒนาและวิธีใช้โปรแกรมกำหนดหน้าที่อุปกรณ์เอฟพีจีเอก่อนทำการทดลอง

ในส่วนของการซอฟต์แวร์ ทีมงานได้เขียนโปรแกรมกำหนดหน้าที่อุปกรณ์เอฟพีจีเอด้วยภาษา Verilog ซึ่งผลงานในส่วนนี้คือไฟล์กำหนดหน้าที่อุปกรณ์เอฟพีจีเอสำหรับ 16 กิจกรรมการเรียนรู้ นักศึกษาผู้ใช้ชุดทดลองสามารถโปรแกรมกำหนดหน้าที่อุปกรณ์เอฟพีจีเอที่ตัวส่งและตัวรับก่อนเริ่มปฏิบัติแต่ละการทดลอง โดยต่ออุปกรณ์เอฟพีจีเอเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB และใช้โปรแกรม Quartus II Programmer ประกอบกับไฟล์ที่ทีมงานได้พัฒนาขึ้น ขั้นตอนหลักของการพัฒนาโปรแกรมกำหนดหน้าที่มีดังต่อไปนี้

- เขียนโปรแกรม Verilog เพื่อกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์เอฟพีจีเอโดยบ่งบอกสัญญาณดิจิทัลขาเข้า (input) และขาออก (output) อย่างชัดเจน วัตถุประสงค์ของการเขียนโปรแกรมเป็นการกำหนดค่าของสัญญาณขาออกให้เป็นไปตามสัญญาณขาเข้า
- หลังจากทำการ compile โปรแกรม Verilog ในขั้นตอนที่ 1 (และแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ เสร็จแล้ว) ปฏิบัติขั้นตอน pin assignment ในโปรแกรม Quartus II เพื่อกำหนดจุดเชื่อมต่อระหว่างวงจรของอุปกรณ์ FPGA และวงจรไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ดีเอสไอและเอดีซีที่ทีมงานพัฒนาขึ้นเอง
- ทำการ compile โปรแกรม Verilog อีกครั้งหลักการทำ pin assignment ในขั้นตอนที่ 2 เพื่อสร้างไฟล์ประเภท object file สำหรับใช้โปรแกรมอุปกรณ์เอฟพีจีเอเพื่อกำหนดหน้าที่ โดยไฟล์จะลงท้ายด้วย “.pof” หรือ “.sof” ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานว่าจะให้หน้าที่ของอุปกรณ์คงอยู่ (กรณี .pof) หรือหายไป (กรณี .sof) หลังจากปิดอุปกรณ์เอฟพีจีเอ แล้วเปิดใหม่อีกครั้ง

ขั้นตอนการใช้ object file เพื่อโปรแกรมกำหนดหน้าที่อุปกรณ์เอฟพีจีเอ

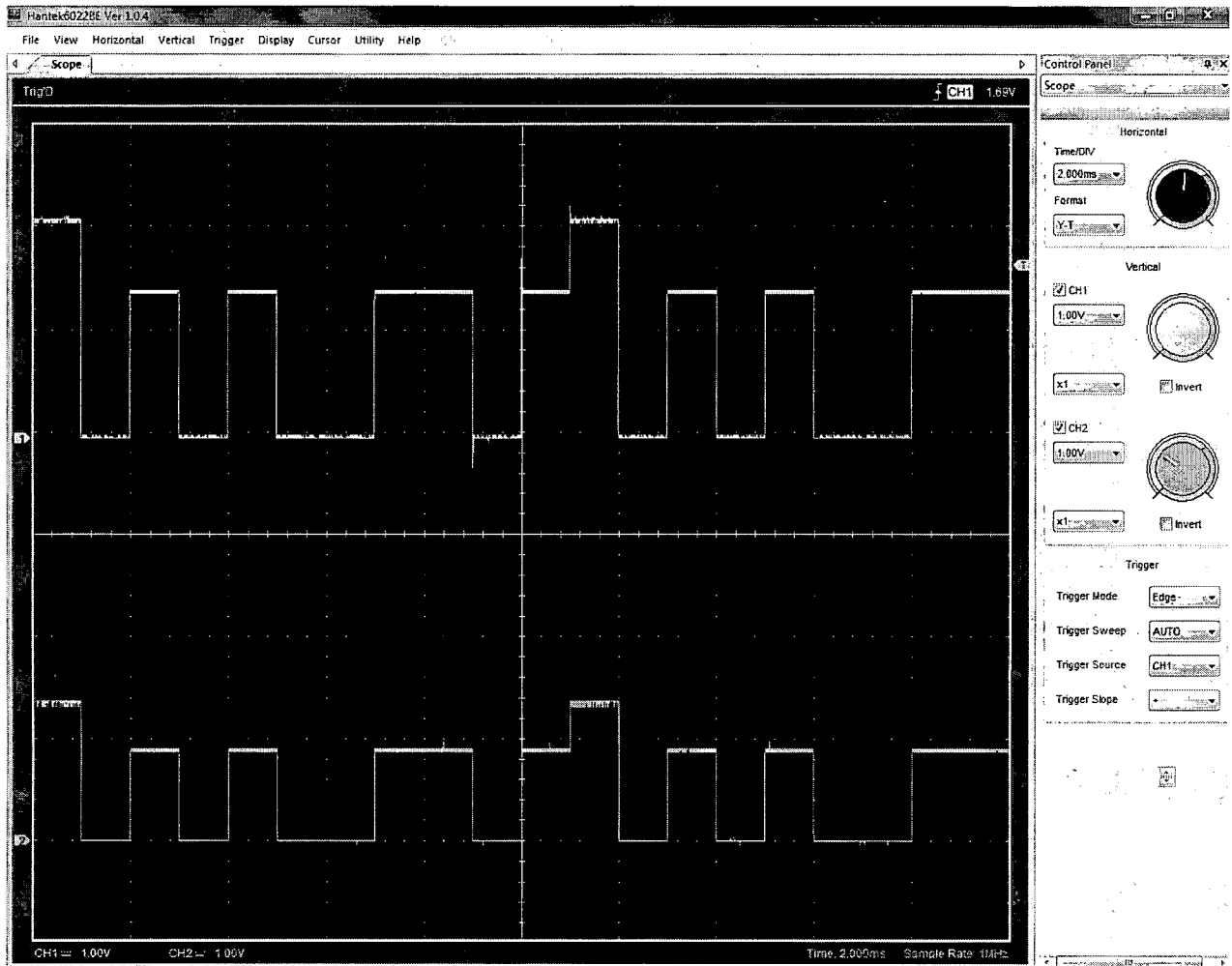
ก่อนทำการทดลองในแต่ละการทดลอง นักศึกษาผู้ใช้ชุดทดลองสามารถโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์เอฟพีจีเอโดยใช้ขั้นตอนต่อไปนี้ ในการทดลองที่มีอุปกรณ์เอฟพีจีเอสองตัว (สำหรับตัวส่งและตัวรับ) ให้โปรแกรมกำหนดหน้าที่ของเอฟพีจีเอทีละตัว

1. เปิดอุปกรณ์เอฟพีจีเอ และต่ออุปกรณ์เอฟพีจีเอกับเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB
2. เปิดโปรแกรม Quartus II Programmer
3. ในหน้าต่างการใช้งานของ Quartus II Programmer กด “Add File...” เพื่อที่จะเลือกไฟล์สำหรับโปรแกรมหน้าที่ของเอฟพีจีเอ
4. เลือกไฟล์ที่เหมาะสมกับการทดลองที่สนใจ เช่น ใช้ไฟล์ l03_Tx.sof กำหนดหน้าที่เอฟพีจีเอของตัวส่งในการทดลองที่ 3 และใช้ไฟล์ l04_Rx.sof กำหนดหน้าที่เอฟพีจีเอของตัวรับในการทดลองที่ 4

5. หลังจากเลือกไฟล์ ในหน้าต่างการใช้งาน กด “Start” เพื่อโปรแกรมอุปกรณ์เอฟพีจีเอ ถ้าโปรแกรมสำเร็จ จะเห็นข้อความ “100% (Successful)” บนพื้นสีเขียวที่มุมขวาบนของหน้าต่างการใช้งาน ในเวลาประมาณ 3-4 วินาที หลังจากโปรแกรมสำเร็จ สามารถถอดสาย USB ระหว่างเอฟพีจีเอกับเครื่องคอมพิวเตอร์ได้เพื่อนำไปใช้โปรแกรมเอฟพีจีเออีกตัวหนึ่ง (ถ้ามี)
6. หากไม่สามารถกดปุ่ม “Start” ได้ในขั้นตอนที่ 5 อาจเป็นเพราะว่าโปรแกรมไม่สามารถเชื่อมต่อกับเอฟพีจีเอได้สำเร็จ ซึ่งในกรณีนี้ จะมีข้อความ “No Hardware” อยู่ข้าง ๆ ปุ่ม “Hardware Setup...” ที่มุมซ้ายบนของหน้าต่างการใช้งาน ถ้าเห็นข้อความนี้ ให้กด “Hardware Setup...” ในหน้าต่างย่อยของ “Hardware Setup” ภายใต้ Tab ชื่อ “Hardware Settings” ให้เปลี่ยนค่าของ “Currently selected hardware:” จาก “No hardware” เป็น “USB Blaster [USB-0]” จากนั้นกด “Close” เพื่อกลับไปหน้าต่างการใช้งานหลัก และทำตามขั้นตอนที่ 5 จนสำเร็จ
7. หากไม่สามารถเปลี่ยนค่าของ “Currently selected hardware:” จาก “No hardware” เป็น “USB Blaster [USB-0]” ได้ในขั้นตอนที่ 6 อาจเป็นเพราะยังไม่ได้ติดตั้ง driver ให้กับ USB Blaster ในกรณีนี้ ให้ปฏิบัติตามขั้นตอนที่อยู่ในเว็บไซต์ต่อไปนี้
<http://www.altera.com/download/drivers/usb-blaster/dri-usb-blaster-vista.html>
หมายเหตุ: กรณียังไม่ได้ติดตั้ง driver นี้ จะไม่เกิดขึ้นกับชุดทดลองที่ส่งมอบในโครงการ แต่อาจจะเกิดขึ้นกับนักศึกษาหรืออาจารย์ผู้ใช้งานที่อยากจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ของตนเองหรือของสถาบันในการทำารทดลอง

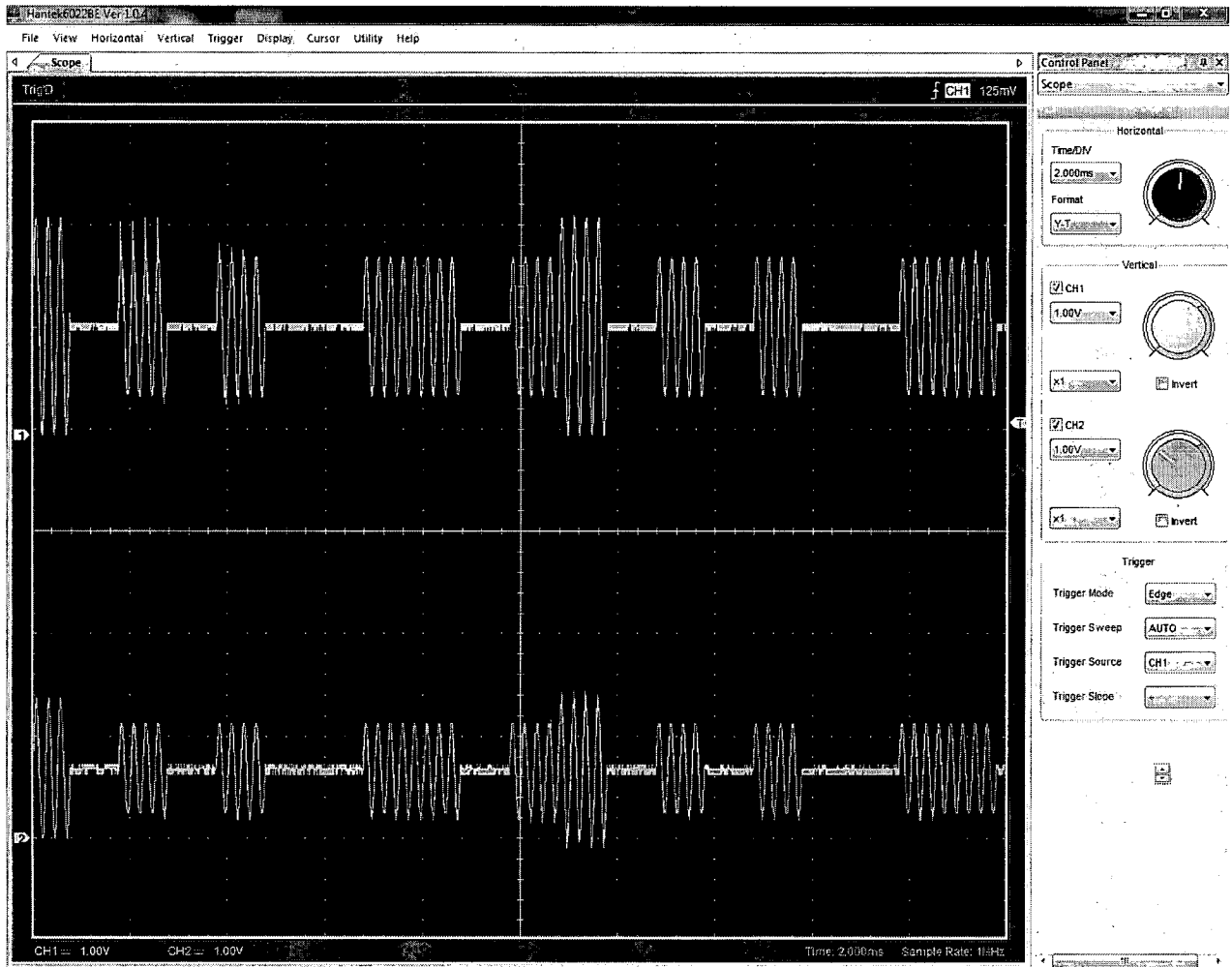
ตัวอย่างสัญญาณที่เห็นได้จากการใช้ชุดทดลอง

รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างสัญญาณของการส่งข้อมูลแบบ PAM ซึ่งส่งสัญญาณที่มีค่าบวกสำหรับบิต 1 และมีค่าลบสำหรับบิต 0 ชุดทดลองจะส่งบิตข้อมูลที่ละกลุ่ม ๆ ละ 10 บิต ต่อเนื่องกันไปแบบไม่รู้จัก โดยมีสัญญาณนำหรือ preamble ที่มีค่าสูงพิเศษ ใช้สำหรับกำหนดส่วนหัวของแต่ละกลุ่มบิตข้อมูล นักศึกษาสามารถกำหนดค่าบิตโดยใช้สวิตช์แบบเลื่อน (slide switch) 10 ตัวบนอุปกรณ์เอฟพีจีเอของตัวส่ง และดูการเปลี่ยนแปลงของคลื่นสัญญาณได้ในรูปที่ 4.18 สวิตช์ 10 ตัวบนอุปกรณ์ FPGA ของตัวส่งถูกตั้งตามบิตข้อมูล 0101001101



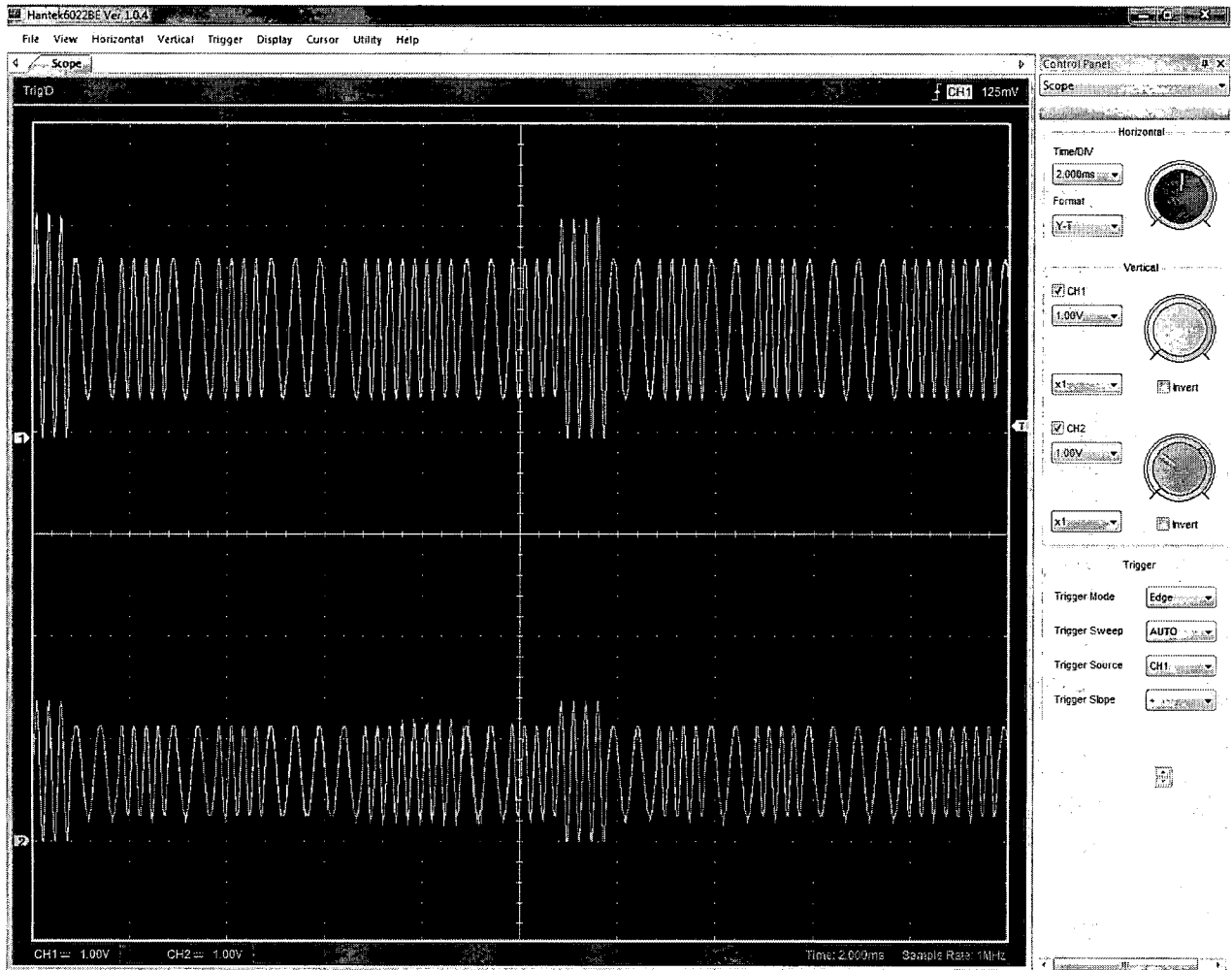
รูปที่ 4.18: สัญญาณที่ถูกส่ง (บน) และรับ (ล่าง) สำหรับการส่งข้อมูลแบบ PAM โดยรูปสัญญาณจะถูกแสดงในหน้าจอของแล็ปท็อปคอมพิวเตอร์ซึ่งเชื่อมต่อกับออสซิลโลสโคปด้วยสาย USB

รูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่างสัญญาณของการส่งข้อมูลแบบ ASK ซึ่งส่งคลื่นพาห์ที่มีค่าแอมพลิจูด (amplitude) สูงหรือกว้างมากสำหรับบิต 1 และมีค่าแอมพลิจูดต่ำหรือกว้างน้อยสำหรับบิต 0 โดยมีสัญญาณ preamble ที่มีค่าแอมพลิจูดสูงพิเศษสำหรับกำหนดส่วนหัวของแต่ละกลุ่มบิตข้อมูล ในรูปที่ 4.19 สวิตช์ 10 ตัวบนอุปกรณ์เอฟพีจีเอของตัวส่งถูกตั้งตามบิตข้อมูล 0101001101 เหมือนในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.19: สัญญาณที่ถูกส่ง (บน) และรับ (ล่าง) สำหรับการส่งข้อมูลแบบ ASK

รูปที่ 4.20 แสดงตัวอย่างสัญญาณของการส่งข้อมูลแบบ FSK ซึ่งส่งคลื่นพาหะที่มีความถี่สูงสำหรับบิต 1 และมีความถี่ต่ำสำหรับบิต 0 โดยมีสัญญาณ preamble ที่มีค่าแอมพลิจูดสูงพิเศษสำหรับกำหนดส่วนหัวของแต่ละกลุ่มบิตข้อมูล ในรูปที่ 4.20 สวิตช์ 10 ตัวบนอุปกรณ์เอพฟี่ไอของตัวส่งถูกตั้งตามบิตข้อมูล 0101001101 เหมือนในรูปที่ 4.18 และ 4.19



รูปที่ 4.20: สัญญาณที่ถูกส่ง (บน) และรับ (ล่าง) สำหรับการส่งข้อมูลแบบ FSK

ราคาต้นทุนโดยประมาณของชุดทดลอง

ตารางที่ 4.3 แสดงราคาต้นทุนโดยประมาณของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้พัฒนาชุดทดลองแต่ละชุด โดยราคาของอุปกรณ์หลาย ๆ อย่าง เช่นอุปกรณ์เอฟพีจีเอ และวัสดุสำหรับวงจรไฟฟ้า ทีมงานได้รับส่วนลดในรูปแบบของการจำหน่ายให้แก่สถาบันการศึกษา โดยรวมต้นทุนของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์เท่ากับ 32,000 บาทต่อชุด

ตารางที่ 4.3: ราคาต้นทุนโดยประมาณของอุปกรณ์ในชุดทดลองที่ถูกพัฒนาขึ้น

อุปกรณ์	จำนวน	ราคาต้นทุน (บาท)
เอฟพีจีเอบน DE0 development board	2	$2 \times 4,000 = 8,000$
วงจรไฟฟ้าดีเอสซี เอดีซี และสายแพ	2	$2 \times 2,500 = 5,000$
ออสซิลโลสโคปแบบเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB	1	3,000
สายเคเบิล BNC และหัวแยก	3	$3 \times 100 = 300$
กล่องเก็บและคู่มือการทดลอง	1	500
แล็ปท็อปคอมพิวเตอร์	1	15,200
รวม	–	32,000

4.3 ผลการประเมินโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์)

4.3.1 ความเห็นและข้อเสนอแนะจากผู้ทรงคุณวุฒิ

ผลการประเมินจาก รศ.ดร.ลัญฉกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ

รศ.ดร.ลัญฉกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ประเมินโปรแกรมจำลองการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล เมื่อวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2558 ดังต่อไปนี้

คุณสมบัติ	มากที่สุด	มาก	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
เนื้อหาเหมาะสมกับวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล		✓			
ความง่ายของการใช้งานมีความเหมาะสมกับนักศึกษา	✓				
ผลงานมีคุณภาพเพียงพอสำหรับสถานศึกษา		✓			

ความเห็นเพิ่มเติม: น่าสนใจมาก นอกจากจะเป็นสื่อการสอนที่มีคุณภาพด้วยตัวของมันเองแล้ว ยังอยากเห็นการผสมผสาน ความร่วมมือ การสร้างสรรค์สื่อการเรียนรู้ 4 ส่วนหลัก ได้แก่ 1. ตำรา 2. ชุดทดลอง 3. สื่อการสอนออนไลน์ 4. วิดีโอของทุกมหาวิทยาลัย

ข้อเสนอแนะ: ความสำเร็จของโครงการนอกจากจะขึ้นอยู่กับเนื้อหาว่ามีความน่าสนใจ และมีประโยชน์จริง ๆ ที่สำคัญกว่า อยู่ที่การนำเสนอเนื้อหาให้สามารถ interact ได้ เห็นรูปสัญญาณและการเปลี่ยนแปลงเมื่อปรับพารามิเตอร์ไป จึงอยู่ที่ศิลปะของผู้ทำด้วย เท่าที่เห็นบางการทดลองไปแล้วบ้าง ชื่นชอบ เห็นถึงความพยายาม ความยากลำบากในการจัดทำ เพราะต้องมีความเชี่ยวชาญทำโปรแกรมมีผ่านเว็บ แล้วก็ต้องเข้าใจทฤษฎีสื่อสารอย่างแจ่มแจ้ง

ผลการประเมินจาก ผศ.ดร.อัฐพงษ์ เทพารักษ์ษณการ

ผศ.ดร.อัฐพงษ์ เทพารักษ์ษณการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที) ได้ประเมินโปรแกรมจำลองการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล เมื่อวันที่ 23 มิถุนายน พ.ศ. 2558 ดังต่อไปนี้

คุณสมบัติ	มากที่สุด	มาก	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
เนื้อหาเหมาะสมกับวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล	✓				
ความง่ายของการใช้งานมีความเหมาะสมกับนักศึกษา		✓			
ผลงานมีคุณภาพเพียงพอสำหรับสถานศึกษา		✓			

ความเห็นเพิ่มเติม: โปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลแบบดิจิทัลนี้มีประโยชน์ต่อการเรียนการสอนมาก ทำให้ผู้ใช้งานสามารถทดสอบผลที่ได้เรียนรู้จากตอนเรียนทฤษฎีในห้องมา ซึ่งทำให้เห็นภาพมากขึ้น และสามารถลองเล่นปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ข้อเสนอแนะ: อยากให้ทีมวิจัยพัฒนาผลงานต่อไปให้มี feature ที่มากขึ้น มีฟังก์ชันสำหรับเทคโนโลยี MIMO และ OFDM เป็นต้น

ผลการประเมินจาก ดร.วัชรพันธ์ สุวรรณสันติสุข

ดร.วัชรพันธ์ สุวรรณสันติสุข คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ประเมินโปรแกรมจำลองการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล เมื่อวันที่ 29 มิถุนายน พ.ศ. 2558 ดังต่อไปนี้

คุณสมบัติ	มากที่สุด	มาก	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
เนื้อหาเหมาะสมกับวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล		✓			
ความง่ายของการใช้งานมีความเหมาะสมกับนักศึกษา	✓				
ผลงานมีคุณภาพเพียงพอสำหรับสถานศึกษา	✓				

ความเห็นเพิ่มเติม: ข้อเด่น

- โปรแกรมจำลองทำงานถูกต้อง กล่าวคือสามารถกำเนิดสัญญาณ, modulate, demodulate, encode, decode, filter, ตอบสนองต่อ input bit และปุ่มกดเลือกแสดงสัญญาณ
- การ upload โปรแกรมจำลองทำงานง่าย เหมาะกับระดับอาชีวศึกษาและปริญญาตรี

ประเด็นที่ปรับปรุงได้

โปรแกรมจำลองสำหรับการทดลองเรื่อง QAM (ภาคส่ง) ลักษณะการจัดสวิตช์ของ input bit แปลก (ในความเห็นของผู้ประเมิน) กล่าวคือ สวิตช์จัดตามบิตที่แยกเป็นส่วน I และ Q แทนที่จะเรียงเป็นสายตาม input bit

ข้อเสนอแนะ: พิจารณาการจัดสวิตช์ของการทดลองเรื่อง QAM ระหว่างวิธีปัจจุบัน (แยกตาม I และ Q) และวิธีเรียงเป็นสาย วิธีปัจจุบันมีข้อดีคือเข้าใจง่าย มีข้อเสียคือ generalize ยากสำหรับ constellation ที่อ่านข้อมูลมาทีละ 3 บิตหรือมากกว่า วิธีเรียงเป็นสายมีข้อดี-ข้อเสียกลับกัน

4.3.2 ผลการประเมินจากผู้เข้าร่วมสัมมนาประเภทอบรมเชิงปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.4 และ 4.5 แสดงผลการประเมินการใช้โปรแกรมจำลองการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล จากการจัดสัมมนาครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยตัวเลขในแต่ละช่องแทนจำนวนผู้ตอบแบบสำรวจที่เลือกช่องนั้น ตารางที่ 4.6 เป็นการประเมินโดยรวมจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4: ผลการประเมินโปรแกรมจากแบบสำรวจความเห็นในงานสัมมนา ECTI-CON 2015 ที่ อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี วันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2558 จำนวนผู้เข้าร่วม 25 คน

หัวข้อ	เห็นด้วย มาก	เห็นด้วย	เห็นด้วย บางส่วน	ไม่เห็น ด้วย
ใช้งานง่าย สำหรับนักศึกษา	14	9	1	–
ใช้งานง่าย สำหรับอาจารย์ผู้สอน	15	8	1	–
ช่วยให้ นักเรียน นักศึกษา เห็นภาพและเข้าใจหลักการของการสื่อสารแบบดิจิทัลมากขึ้น	9	13	2	–

ตารางที่ 4.5: ผลการประเมินโปรแกรมจากแบบสำรวจความเห็นในงานสัมมนาที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที)

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี วันที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 จำนวนผู้เข้าร่วม 13 คน

หัวข้อ	เห็นด้วย มาก	เห็นด้วย	เห็นด้วย บางส่วน	ไม่เห็น ด้วย
ใช้งานง่าย สำหรับนักศึกษา	9	4	–	–
ใช้งานง่าย สำหรับอาจารย์ผู้สอน	8	5	–	–
ช่วยให้ นักเรียน นักศึกษา เห็นภาพและเข้าใจหลักการของการ สื่อสารแบบดิจิทัลมากขึ้น	7	4	1	–

ตารางที่ 4.6: ผลการประเมินโดยรวมจากการจัดสัมมนา รวม 2 ครั้ง

หัวข้อ	เห็นด้วย มาก	เห็นด้วย	เห็นด้วย บางส่วน	ไม่เห็น ด้วย
ใช้งานง่าย สำหรับนักศึกษา	23	13	1	–
ใช้งานง่าย สำหรับอาจารย์ผู้สอน	23	13	1	–
ช่วยให้ นักเรียน นักศึกษา เห็นภาพและเข้าใจหลักการของการ สื่อสารแบบดิจิทัลมากขึ้น	16	17	3	–

4.4 ผลการประเมินชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์)

4.4.1 ความเห็นและข้อเสนอแนะจากผู้ทรงคุณวุฒิ

ผลการประเมินจาก รศ.ดร.ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ

รศ.ดร.ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ประเมินชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล เมื่อวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2558 ดังต่อไปนี้

คุณสมบัติ	มากที่สุด	มาก	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
เนื้อหาเหมาะสมกับวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล		✓			
ความยากง่ายของการใช้งานมีความเหมาะสมกับนักศึกษา	✓				
ผลงานมีคุณภาพเพียงพอสำหรับสถานศึกษา		✓			

ความเห็นเพิ่มเติม: เป็นโครงการที่มีศักยภาพสูง สามารถส่งผลต่อคุณภาพการศึกษาด้านสื่อสารโทรคมนาคมขั้นพื้นฐานได้อย่างจริงจัง และเป็นรูปธรรม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้พัฒนาว่าจะสร้างสรรค์นวัตกรรมจากชุดทดลองที่มีอยู่อย่างไร

เมื่อพิจารณาจากชุดทดลองที่สาธิต พบว่าเข้าใจง่าย (ถ้ามีพื้นความรู้ทางทฤษฎีอยู่บ้าง) ไม่ซับซ้อนเกินไป จำเป็น ได้ ความรู้สึกของการทำอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ ซึ่งหากใช้ของต่างประเทศมีราคาสูงมาก (ฟังก์ชันจำนวนมากที่มีอยู่ก็มักไม่ถูก นำมาใช้งาน)

ข้อเสนอแนะ:

- 1. พัฒนาการทดลองใหม่ ๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ผู้สอนสามารถเลือกใช้ได้ตามปรารถนา เชื่อว่าจะมีการทดลอง ใหม่ ๆ ได้อีกจำนวนมาก ไม่มีข้อจำกัด
- 2. จัดสาธิตชุดทดลองให้แก่อาจารย์มหาวิทยาลัยที่สอนด้านสื่อสารทั่วประเทศ เห็นควรมีงบประมาณส่งเสริม เพิ่มเติมในส่วนนี้ เพื่อแลกเปลี่ยนความรู้กับคณาจารย์ผู้สอน ทำให้มีการพัฒนาชุดทดลองตามความ ความ ต้องการของแต่ละมหาวิทยาลัย (กล่าวคือ ให้คณาจารย์ในทุกมหาวิทยาลัยได้ร่วมกันสร้างสรรค์)
- 3. คู่มือชุดทดลองสามารถจัดทำในเชิงพาณิชย์ได้ เพื่อให้ นศ. ได้ทบทวนความรู้ก่อนการทดลอง เพื่อเตรียม ความพร้อมให้แก่ นศ. และมีการย้ำเน้นในประเด็นสำคัญที่ นศ. จะให้ความสำคัญ ก่อให้เกิดการเรียนรู้
- 4. ภาครัฐควรผลักดันให้เป็นมาตรฐานของการเรียนการสอน ว่าต้องเป็นการทดลองมากขึ้นกว่าในปัจจุบัน ชุด ทดลองดังกล่าวมีราคาประหยัด สามารถนำเสนอความรู้ได้อย่างเป็นรูปธรรม จำต้องได้ และ นศ. ยังสามารถ ต่อยอดการทดลองของตนเองได้

ผลการประเมินจาก ผศ.ดร.อัฐพงษ์ เทพารักษ์ขณการ

ผศ.ดร.อัฐพงษ์ เทพารักษ์ขณการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที) ได้ ประเมินชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล เมื่อวันที่ 23 มิถุนายน พ.ศ. 2558 ดังต่อไปนี้

คุณสมบัติ	มากที่สุด	มาก	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
เนื้อหาเหมาะสมกับวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล	✓				
ความง่ายของการใช้งานมีความเหมาะสมกับนักศึกษา		✓			
ผลงานมีคุณภาพเพียงพอสำหรับสถานศึกษา		✓			

ความเห็นเพิ่มเติม: ชุดทดลองนี้เป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนการสื่อสารแบบดิจิทัลอย่างมาก ทำให้ผู้ใช้สามารถ เห็นถึงภาพจริง ๆ นอกเหนือจากที่ได้เรียนจากทฤษฎีในห้องหรือจาก simulation นอกจากนี้ ยังเป็นประโยชน์ สำหรับผู้ที่ต้องการทำการวิจัยพัฒนาต่อยอดออกไป ราคาไม่แพง

ข้อเสนอแนะ: อยากให้ทีมวิจัยพัฒนาผลงานต่อไปให้มี feature ที่มากขึ้น เช่น modulation order, channel coding ที่หลากหลายมากขึ้น, AWGN หรือแม้กระทั่ง fading model และวางแผนเพื่อสามารถเป็นชุดที่ต่อยอดทำ วิจัยทางด้านสื่อสารไร้สายในอนาคตได้ เช่นมี MIMO, OFDM เป็นต้น

ผลการประเมินจาก ดร.วัชรพันธ์ สุวรรณสันติสุข

ดร.วัชรพันธ์ สุวรรณสันติสุข คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ประเมินชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล เมื่อวันที่ 29 มิถุนายน พ.ศ. 2558 ดังต่อไปนี้

คุณสมบัติ	มากที่สุด	มาก	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด
เนื้อหาเหมาะสมกับวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล		✓			
ความยากง่ายของการใช้งานมีความเหมาะสมกับนักศึกษา	✓				
ผลงานมีคุณภาพเพียงพอสำหรับสถานศึกษา	✓				

ความเห็นเพิ่มเติม: ข้อเด่น

- ชุดทดลองสอดคล้องกับเนื้อหาในรายวิชาและมีเอกสารประกอบการทดลองที่สมบูรณ์ (มีแบบฝึกหัดก่อนการทดลองช่วยให้ นศ. เข้าใจการทดลองมากขึ้น ขั้นตอนการทดลองเป็นระบบระเบียบ เอกสารพิมพ์ด้วย LaTeX ทำให้สัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์อ่านง่าย)
- ชุดทดลองมีความยืดหยุ่น สามารถเปลี่ยนหน้าที่ของชุดทดลองภาครับ-ภาคส่งโดยใช้ซอฟต์แวร์
- ชุดทดลองภาครับ-ภาคส่ง มีสวิตช์และปุ่มกด สามารถปรับบิตที่ส่ง และแสดงผลของสัญญาณได้หลายแบบ
- ชุดทดลองพกพาง่าย ราคาย่อมเยากว่าอุปกรณ์ที่ขายทางการค้า เหมาะสมกับระดับการเรียนรู้ของ นศ. อาชีวศึกษา และปริญญาตรี
- ชุดทดลองสามารถแสดงหลักการที่สำคัญของการสื่อสารแบบดิจิทัล เช่น quantization, sample, symbol time, channel coding, modulation, preamble, processing delay, demodulation, และ matched filter เป็นต้น เป็นประโยชน์ช่วยให้ นศ. เข้าใจระบบสื่อสารแบบดิจิทัลยิ่งขึ้น

ประเด็นที่ปรับปรุงได้

- ผลของสิ่งรบกวน (additive noise) ไม่ปรากฏอยู่ในส่วนหนึ่งของชุดทดลอง
- ชุดทดลองไม่ครอบคลุมหัวข้อเรื่องความถี่ เช่น รูปแบบสัญญาณในโดเมนความถี่ หรือ bandwidth
- การทดลองขาดส่วนที่ นศ. ประยุกต์สิ่งที่เรียนเข้ากับชุดทดลอง (เช่น วิเคราะห์ ออกแบบ หรือ ปรับแต่งด้วยตัวเอง)

ข้อเสนอแนะ:

- หลังจบการทดลองแต่ละครั้ง เพิ่มคำถามในเอกสารประกอบการทดลองเพื่อทดสอบการประยุกต์ หรือการเรียนรู้ที่สูงขึ้น ตัวอย่างคำถามเช่น ให้อาจารย์ภาพสัญญาณที่ภาครับจาก matched filter แล้ว และให้ นศ. คิดว่าภาคส่งส่งบิตอะไรมา และใช้ชุดทดลองทดสอบว่าสิ่งที่คิดนั้นถูกต้องหรือไม่
- สำหรับการทดลองในอนาคต เช่นเรื่อง baseband เป็น passband อาจเพิ่มหัวข้อเสริม สำหรับผู้ทดลองที่มีเครื่องวิเคราะห์ความถี่ (spectrum analyzer) เพื่อดูสัญญาณในแกนความถี่ เปรียบกับสัญญาณในแกนเวลา
- สำหรับชุดทดลองในอนาคต อาจพิจารณาเพิ่ม additive noise ระหว่างภาครับและภาคส่ง หรือเพิ่มการทดลองที่ทำให้ นศ. เห็นผลของ additive noise หรือผลของช่องสัญญาณสื่อสารต่อสัญญาณที่ได้รับ

4.4.2 ผลการประเมินจากผู้เข้าร่วมสัมมนาประเภทอบรมเชิงปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.7 4.8 และ 4.9 แสดงผลการประเมินการใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล จากการจัดสัมมนาครั้งที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ โดยตัวเลขในแต่ละช่องแทนจำนวนผู้ตอบแบบสำรวจที่เลือกช่องนั้น ตารางที่ 4.10 เป็นการประเมินโดยรวมจากข้อมูลในตารางที่ 4.7 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.7: ผลการประเมินโปรแกรมจากแบบสำรวจความเห็นในงานสัมมนา ECTI-CON 2015 ที่ อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี วันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2558 จำนวนผู้เข้าร่วม 25 คน

หัวข้อ	เห็นด้วย มาก	เห็นด้วย	เห็นด้วย บางส่วน	ไม่เห็น ด้วย
ใช้งานง่าย สำหรับนักศึกษา	13	12	–	–
ใช้งานง่าย สำหรับอาจารย์ผู้สอน	16	8	–	–
ช่วยให้ นักเรียน นักศึกษา เห็นภาพและเข้าใจหลักการของการสื่อสารแบบดิจิทัลมากขึ้น	11	10	3	–
ใช้งานง่ายกว่าเมื่อเทียบกับชุดทดลองที่มีอยู่ในห้องตลาด เช่น LabVolt Agilent NI	5	13	3	–
เหมาะสำหรับใช้งานในสถาบันของท่าน	15	6	2	–

ตารางที่ 4.8: ผลการประเมินโปรแกรมจากแบบสำรวจความเห็นในงานสัมมนาที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที)

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี วันที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 จำนวนผู้เข้าร่วม 13 คน

หัวข้อ	เห็นด้วย มาก	เห็นด้วย	เห็นด้วย บางส่วน	ไม่เห็น ด้วย
ใช้งานง่าย สำหรับนักศึกษา	8	5	–	–
ใช้งานง่าย สำหรับอาจารย์ผู้สอน	8	5	–	–
ช่วยให้ นักเรียน นักศึกษา เห็นภาพและเข้าใจหลักการของการ สื่อสารแบบดิจิทัลมากขึ้น	10	3	–	–
ใช้งานง่ายกว่าเมื่อเทียบกับชุดทดลองที่มีอยู่ในห้องตลาด เช่น LabVolt Agilent NI	6	6	1	–
เหมาะสำหรับใช้งานในสถาบันของท่าน	10	3	–	–

ตารางที่ 4.9: ผลการประเมินโปรแกรมจากแบบสำรวจความเห็นในงานสัมมนาที่มหาวิทยาลัยกรุงเทพ วิทยาเขตรังสิต

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี วันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 ผู้เข้าอบรม 11 คน

หัวข้อ	เห็นด้วย มาก	เห็นด้วย	เห็นด้วย บางส่วน	ไม่เห็น ด้วย
ใช้งานง่าย สำหรับนักศึกษา	8	3	–	–
ใช้งานง่าย สำหรับอาจารย์ผู้สอน	9	2	–	–
ช่วยให้ นักเรียน นักศึกษา เห็นภาพและเข้าใจหลักการของการ สื่อสารแบบดิจิทัลมากขึ้น	7	4	–	–
ใช้งานง่ายกว่าเมื่อเทียบกับชุดทดลองที่มีอยู่ในห้องตลาด เช่น LabVolt Agilent NI	8	3	–	–
เหมาะสำหรับใช้งานในสถาบันของท่าน	8	3	–	–

ตารางที่ 4.10: ผลการประเมินโดยรวมจากการจัดสัมมนา รวม 3 ครั้ง

หัวข้อ	เห็นด้วย มาก	เห็นด้วย	เห็นด้วย บางส่วน	ไม่เห็น ด้วย
ใช้งานง่าย สำหรับนักศึกษา	29	20	–	–
ใช้งานง่าย สำหรับอาจารย์ผู้สอน	33	15	–	–
ช่วยให้ นักเรียน นักศึกษา เห็นภาพและเข้าใจหลักการของการ สื่อสารแบบดิจิทัลมากขึ้น	28	17	3	–
ใช้งานง่ายกว่าเมื่อเทียบกับชุดทดลองที่มีอยู่ในห้องตลาด เช่น LabVolt Agilent NI	19	22	4	–
เหมาะสำหรับใช้งานในสถาบันของท่าน	33	12	2	–

4.5 ผลจากการทดลองใช้ชุดทดลอง

ในโครงการย่อยที่ 3 ทีมงานได้จัดการเรียนการสอนจริงโดยใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โดยประสานงานกับวิทยาลัยอาชีวศึกษา 3 แห่ง ในภาคปลายของปีการศึกษา พ.ศ. 2557 อ.สมณธร พุ่มพิมล (วิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ) และ อ.เอกพจน์ เขียวคล้าย (วิทยาลัยเทคนิคกาญจนาภิเษก มหานคร) เป็นผู้ทำการสอนวิชา ระบบสื่อสารดิจิทัล แต่เนื่องจากวิทยาลัยเทคนิคมีบุรี ไม่เปิดสอนวิชาระบบสื่อสารดิจิทัล และไม่มีอาจารย์ที่เชี่ยวชาญในสาขานี้โดยตรง อ.มนตรี ประชาธน์ ซึ่งสอนวิชาที่ใกล้เคียง ได้แก่ อิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม จึงเปิดให้หัวหน้าโครงการ รศ.ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ เข้าทำการสอนแก่นักศึกษาในวิชาอิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม โดยทำการสอนเป็นเวลา 3 ครั้ง (ใน 3 สัปดาห์) และนำนักศึกษาทำการทดลองเพียงครั้งเดียว ทั้งนี้เนื่องจากนักศึกษาไม่มีความรู้พื้นฐานพอที่จะทำการทดลองที่เหลือ

สำหรับวิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ และวิทยาลัยเทคนิคกาญจนาภิเษก มหานคร ซึ่งมีการเรียนการสอนวิชาระบบสื่อสารดิจิทัลเต็มภาคเรียน ทีมงานได้มอบแบบทดสอบประเมินความรู้พื้นฐานให้แก่อาจารย์ผู้สอนเพื่อวัดระดับความรู้ก่อนและหลังการใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โดยแบบทดสอบนี้อยู่ในเอกสารแนบ ข

สำหรับคู่มือกิจกรรมการเรียนรู้จำนวน 16 กิจกรรม ได้แนบมาพร้อมกับรายงานฉบับนี้ โดยคู่มือนี้รวมถึงการทบทวนพื้นฐานความรู้ที่เกี่ยวข้อง แบบฝึกหัด คำอธิบายการทดลอง และใบงานที่นักศึกษาต้องส่งหลังเสร็จสิ้นแต่ละกิจกรรม เพื่อส่งเสริมแนวทางการเรียนการสอนแบบห้องเรียนกลับทาง (flip classroom) คู่มือกิจกรรมจึงถูกเขียนในลักษณะที่ให้นักศึกษาได้ลองปฏิบัติและเรียนรู้ด้วยตนเอง ไม่จำเป็นต้องมีการบรรยายก่อนการทดลอง ยกเว้นแต่เพียงการอธิบายการเชื่อมต่อชุดทดลองและการโปรแกรมอุปกรณ์เอฟพีจีเอในการทดลองแรกสุด

ตารางที่ 4.11 แสดงคะแนนทดสอบประเมินความรู้พื้นฐานก่อนและหลังการใช้ชุดทดลองสำหรับนักศึกษาจากวิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ โดยใช้แบบทดสอบเดียวกันประเมินความรู้ก่อนและหลังการใช้ชุดทดลอง จะเห็นได้ว่านักศึกษาสามารถตอบคำถามในแบบทดสอบได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.11: คะแนนทดสอบประเมินความรู้พื้นฐานก่อนและหลังการใช้ชุดทดลอง
(วิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ)

ลำดับที่	ชื่อ-นามสกุล	คะแนนก่อน	คะแนนหลัง
1	นายพิชญานนท์ ทุมมาลา	8	12
2	นายรัฐพงศ์ หวังพิทักษ์	7	13
3	นายสุพาวฒน์ ฉายศรี	7	13
4	นายณัฐพล ทองสีแดง	7	13
5	นายจิรวุฒน์ พูลเกษม	6	11
6	นายพชร ปัญญาชน	5	13
7	นายโอฬาร แสงกระโทก	5	12
8	นายปณยวีร์ สุขบงกช	5	13
9	นายวัฒนา มาพบ	5	13
10	นายณัฐวุฒิ เสี่ยงนองแบน	4	13
11	นายสิทธิศักดิ์ นิรารมย์	3	13
12	นายเกรียงไกร จันทรมณี	2	12
	เฉลี่ย	5.33	12.58

ตารางที่ 4.12 แสดงคะแนนทดสอบประเมินความรู้พื้นฐานก่อนและหลังการใช้ชุดทดลองสำหรับนักศึกษาจากวิทยาลัยเทคนิคกาญจนาภิเษก มหานคร การประเมินความรู้พื้นฐานในกรณีนี้ ใช้แบบทดสอบต่างกันสำหรับการประเมินก่อนและหลังการใช้ชุดทดลอง จะเห็นได้ว่านักศึกษาสามารถตอบคำถามในแบบทดสอบได้ดีขึ้น แต่คะแนนไม่ได้มากขึ้นกว่าก่อนเท่าในกรณีที่ใช้แบบทดสอบเดียวกันสำหรับก่อนและหลังการใช้ชุดทดลอง

ตารางที่ 4.12: คะแนนทดสอบประเมินความรู้พื้นฐานก่อนและหลังการใช้ชุดทดลอง
(วิทยาลัยเทคนิคกาญจนาภิเษก มหานคร)

ลำดับที่	ชื่อ-นามสกุล	คะแนนก่อน	คะแนนหลัง
1	นายภาณุพงศ์ อิ่มรส	9	12
2	นายชยานันต์ สารศรี	8	12
3	นายยุทธภูมิ เผ่าอินทร์จันทร์	6	4
4	นายพงศกร วิชาธรรม	6	6
5	นายศุภกร อัสโย	5	5
6	นายอิทธิกรณ นิระภัย	5	5
7	นายวทันย์ ไชยโอสถ	3	4
8	นายเมธี วงศ์เมือง	0	4
	เฉลี่ย	5.25	6.50

นอกเหนือจากคะแนนสอบประเมินความรู้พื้นฐานก่อนและหลังการใช้ชุดทดลอง ทีมงานได้ตรวจสอบความสมบูรณ์ของใบงานที่นักศึกษาส่งมอบให้แก่อาจารย์ผู้สอน พบว่าใบงานเกือบทั้งหมด (ประมาณ 95%) มีความสมบูรณ์เป็นที่น่าพอใจ นักศึกษาสามารถวาดรูปสัญลักษณ์และตอบคำถามได้อย่างถูกต้อง

การประเมินผลการประยุกต์ใช้ในลำดับสุดท้ายเป็นการถามความเห็นจากอาจารย์ผู้สอนโดยตรง ซึ่งเป็นการสอบถามความเห็นจากการสังเกตพฤติกรรมนักศึกษาในห้องเรียน และความเห็นเกี่ยวกับชุดทดลองที่ทีมงานพัฒนาขึ้นว่ามีประโยชน์ในการเรียนการสอนจริงหรือไม่ อย่างไร

ความเห็นจาก อ.เอกพจน์ คล้ายเขียว วิทยาลัยเทคนิคกาญจนาภิเษก มหานคร

จากการใช้ ชุดทดลองสามารถช่วยในการเรียนการสอนได้ดี ช่วยให้ นศ. ให้เข้าใจมากขึ้น นศ. ได้เห็นของจริง ว่าทฤษฎีที่ตัว นศ. ได้เรียนไป กระบวนการของการรับการส่งสัญญาณออกมาเป็นอย่างไร นศ. ที่ได้ทดลองจากชุดทดลองนี้ 90% สนใจและมีพัฒนาการที่ดีขึ้นจากชุดทดลอง นศ. ชอบและอยากที่จะได้ทดลองอีก

ส่วนที่อยากให้เพิ่มคือ ทฤษฎีในส่วนเริ่มต้นของใบงานเพื่อเป็นการทบทวนความรู้ที่ นศ. ได้เรียนมา แล้วให้มีส่วนของสรุปใบงานการทดลอง เพื่อจะให้ได้ว่า นศ. มีความเข้าใจผลที่ออกมาของการทดลองหรือไม่

ความเห็นจาก อ.สมณธร พุ่มพิมล และ นศ. วิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ

ภาคส่งสัญญาณ (FPGA Transmitter)

ตามใบงาน มีความเที่ยงตรงสูง การโปรแกรมถูกต้องและใช้งานได้ง่าย รูปสัญญาณ ไม่ผิดเพี้ยน รูปแบบการส่งสัญญาณจากการกำหนดตำแหน่งของสวิตช์ถูกต้อง สายแพร์ สามารถถอดและใส่ได้สะดวก ฟังก์ชันต่าง ๆ ในการประมวลสัญญาณถูกต้อง แผงวงจรมีการป้องกันการสัมผัสจากมือของผู้ทดลอง

ภาครับสัญญาณ (FPGA Receiver)

ตามใบงาน มีความเที่ยงตรงสูง การโปรแกรมถูกต้องและใช้งานได้ง่าย รูปสัญญาณ ไม่ผิดเพี้ยน การถอดรหัสสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณและฟังก์ชันต่าง ๆ ในการประมวลผลสัญญาณถูกต้อง สายแพร์ สามารถถอดและใส่ได้สะดวก แผงวงจรมีการป้องกันการสัมผัสจากมือของผู้ทดลอง

Box Oscilloscope สามารถวัดสัญญาณได้ถูกต้อง แสดงผลข้อมูลจากภาคส่งและภาครับได้ชัดเจน พกพาสะดวก ไม่ต้องใช้เครื่องใหญ่ สามารถเรียนรู้ที่ใดก็ได้

ขั้วต่อ หัวแยก ชนิด BNC สามารถใช้งานได้ดี มีความคงทน สัญญาณไม่สูญเสีย

ชุดจ่ายไฟสำหรับแผงทดลอง เป็นอะแดปเตอร์ ใช้งานได้สะดวก

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่มีการกำหนดฟังก์ชันในการทดลองที่เขียนไว้สำเร็จรูปแล้ว จึงนำมา Start และ Run ได้เลย

ข้อเสนอแนะ เนื่องจากผู้ใช้งานได้เปรียบเทียบการใช้งานกับชุดฝึกในต่างประเทศแล้ว ชุดทดลองในโครงการวิจัยครั้งนี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ได้ดี และมีราคาถูกกว่า จึงขอแนะนำให้สร้างเป็นสื่อการเรียนรู้เชิงพาณิชย์ ต่อไป

4.6 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

จากการประเมินสื่อการเรียนรู้ทั้งแบบซอฟต์แวร์และแบบฮาร์ดแวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นในโครงการนี้ โดยความเห็นและข้อเสนอแนะจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาการสื่อสารแบบดิจิทัล จากผู้เข้าร่วมสัมมนาแบบอบรมเชิงปฏิบัติการ และจากอาจารย์ผู้นำสื่อการเรียนรู้ไปใช้จริงในวิทยาลัยอาชีวศึกษา มีประเด็นหลัก ๆ ที่สามารถสรุปเพื่อใช้เป็นข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อยอดได้ดังต่อไปนี้

- โปรแกรมจำลองผลการทดลอง จะมีประโยชน์มากถ้าหากนำเสนอคู่กับตำราวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล เนื่องจากนักศึกษาจะสามารถเรียนรู้จากตำราและทำการทดลองควบคู่กันไปด้วยตนเองตามอัธยาศัย
- เนื้อหาของโปรแกรมจำลองผลการทดลอง สามารถครอบคลุมได้ไกลกว่าเนื้อหาของชุดทดลอง เนื่องจากไม่มี

ข้อจำกัดในเรื่องของฮาร์ดแวร์ จึงสามารถพัฒนาล่วงหน้าก่อนพัฒนาชุดทดลองตามไปในภายหลัง

- สำหรับทั้งโปรแกรมจำลองผลการทดลองและชุดทดลอง ควรจะสถิติผลกระทบของสัญญาณรบกวนต่อประสิทธิภาพในการส่งบิตข้อมูลได้ เช่นการเพิ่มขึ้นของกำลังสัญญาณรบกวนจะส่งผลให้อัตราบิตผิดพลาด (bit error rate : BER) นั้นสูงขึ้นตาม
- สำหรับทั้งโปรแกรมจำลองผลการทดลองและชุดทดลอง สามารถพัฒนาต่อเนื่องเพื่อสถิติการส่งข้อมูลแบบใช้หลายคลื่นพาห์ (multicarrier transmission) เช่นเทคนิคโอเอฟดีเอ็ม (orthogonal frequency division multiplexing : OFDM) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมในระบบสื่อสารสมัยใหม่
- สำหรับชุดทดลอง สามารถพัฒนาต่อเนื่องในส่วนของสื่อกายภาพได้ เช่นเปลี่ยนจากสายส่งเป็นเส้นใยนำแสง และส่งแบบไร้สายผ่านสายอากาศ เป็นต้น
- ในปัจจุบัน ชุดทดลองเน้นการแสดงสัญญาณข้อมูลของการส่งข้อมูลด้วยวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบต่าง ๆ เพื่อให้นักศึกษาเห็นภาพและมองว่าเนื้อหาวิชาการสื่อสารแบบดิจิทัลเป็นสิ่งที่จับต้องได้ ไม่ลึกลับซับซ้อนอย่างที่หลาย ๆ คนคิดกัน อย่างไรก็ตาม ในการนำไปใช้ในระดับอุดมศึกษา ควรจะพัฒนาชุดทดลองให้นักศึกษาได้แก้ปัญหาบางอย่างเพื่อการเรียนรู้ นอกเหนือจากการสังเกตเป็นหลัก เช่นต้องตั้งค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนประมวลสัญญาณต่าง ๆ ให้เหมาะสม ตัวรับจึงจะรับบิตข้อมูลได้อย่างถูกต้อง
- การอบรมอาจารย์ผู้สอนเป็นสิ่งจำเป็น ถึงแม้ว่าชุดทดลองและคู่มือ จะถูกออกแบบให้นักศึกษาสามารถเรียนรู้ด้วยตนเองแทบจะทั้งหมด แต่บ่อยครั้งที่นักศึกษาจะมีคำถามเกี่ยวกับสิ่งที่ตนเห็นจากชุดทดลอง ซึ่งอาจารย์ที่ผ่านการอบรมสามารถตอบคำถามได้ชัดเจนกว่า
- จำนวนนักศึกษาที่ใช้ชุดทดลองร่วมกันไม่ควรจะเกิน 2 คนต่อชุด เนื่องจากนักศึกษาคนที่ 3 เป็นต้นไป จะเริ่มมีเวลาว่าง และหันไปสนใจสิ่งอื่น เช่นใช้แล็ปท็อปคอมพิวเตอร์ดูเว็บไซต์ หรือเล่น smart phone เป็นต้น
- การสอบประเมินความรู้พื้นฐาน ควรจะทำบ่อยครั้งขึ้น แทนที่จะทำก่อนและหลังภาคเรียนเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อจะได้เก็บข้อมูลประโยชน์ของสื่อการเรียนรู้ได้อย่างละเอียดขึ้น
- หลายฝ่ายเห็นประโยชน์ของระบบสื่อสารประเภท software defined และคิดว่าควรจะผลักดันให้เกิดความร่วมมือทางวิชาการระหว่างสถาบันการศึกษาต่าง ๆ เพื่อระดมสมองและความสามารถมาช่วยกันพัฒนาระบบสื่อสารขึ้นเองภายในประเทศไทย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยสามารถสรุปโดยอิงตามวัตถุประสงค์ของแต่ละโครงการย่อยได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 สรุปผลโครงการย่อยที่ 1

วัตถุประสงค์หลักของโครงการย่อยนี้ คือการพัฒนาโปรแกรมจำลองการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โดยมีข้อสรุปผลการดำเนินกิจกรรมของโครงการย่อยดังต่อไปนี้

- ได้กำหนดเนื้อหากิจกรรมการเรียนรู้ทั้งหมดจำนวน 16 กิจกรรม ซึ่งเหมาะสมสำหรับการเรียนการสอนใน 1 ภาคเรียน เนื้อหากิจกรรมอิงตามเนื้อหาบางส่วนของวิชาระบบสื่อสารดิจิทัล รหัส 3105-9009 ในหลักสูตร ปวส. สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ. 2557 โดยรายละเอียดของกิจกรรมและขั้นตอนการทดลองมาจากการระดมสมองภายในทีมงาน และการพูดคุยกับอาจารย์ผู้สอนในวิทยาลัยอาชีวศึกษา 3 แห่ง ได้แก่ วิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี วิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ และวิทยาลัยกาญจนาภิเษก มหานคร อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีการอิงเนื้อหากิจกรรมบางส่วนตามวิชาระบบสื่อสารดิจิทัลในหลักสูตร ปวส. กิจกรรมการเรียนรู้ที่เป็นผลลัพธ์ของโครงการวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เสริมการเรียนการสอนวิชาที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารแบบดิจิทัลโดยทั่วไป ทั้งในระดับอาชีวศึกษาและในระดับอุดมศึกษา ไม่จำกัดเพียงการเสริมวิชาระบบสื่อสารดิจิทัลในหลักสูตร ปวส. เท่านั้น
- ได้พัฒนาโปรแกรมจำลองการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โดยอิงตามเนื้อหาใน 16 กิจกรรมการเรียนรู้ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้ว โปรแกรมถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้จาวาสคริปต์ (JavaScript) สามารถใช้งานผ่านโปรแกรมเบราว์เซอร์ที่มีอยู่ทั่วไป เช่น Explorer Firefox และ Chrome โดยไม่ขึ้นกับระบบปฏิบัติการ เช่น Windows iOS และ Linux นอกจากนี้ ยังสามารถใช้งานได้จากคอมพิวเตอร์แบบพกพา เช่น tablet PC และ smart phone ทำให้สะดวกต่อการเรียนรู้ตามอัธยาศัยของนักศึกษาในสถานที่และในโอกาสต่าง ๆ อนึ่ง การพัฒนาโปรแกรมจำลองผลการทดลองเพื่อให้ใช้งานผ่านโปรแกรมเบราว์เซอร์นั้น ยังจะเอื้อให้นักศึกษาสามารถใช้โปรแกรมผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสำหรับการเรียนรู้ทางไกลอีกด้วย
- ได้จัดงานอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อสาธิตการใช้โปรแกรมจำลองการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (ควบคู่ไปกับการสาธิตการใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล) โดยจัดทั้งหมด 2 ครั้ง ครั้งแรกเป็นส่วนหนึ่งของงานสัมมนาทางวิชาการ ECTI-CON 2015 ที่ อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี เมื่อวันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2558 และครั้งที่ 2 จัดที่ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที) อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี เมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

- ได้ดำเนินการใช้โปรแกรมจำลองการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลต่อผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน ได้แก่ รศ.ดร.ลัญฉกร วุฒิสถิธิกุลกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผศ.ดร.อัฐพงษ์ เทพารักษ์ษณากร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที) และ ดร.วัชรพันธ์ สุวรรณสันติสุข คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2558

5.1.2 สรุปผลโครงการย่อยที่ 2

วัตถุประสงค์หลักของโครงการย่อยนี้ คือการผลิตชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลสำหรับการเรียนการสอนวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล โดยมีข้อสรุปผลการดำเนินกิจกรรมของโครงการย่อยดังต่อไปนี้

- ออกแบบและผลิตชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล ซึ่งมีทั้งส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ (ซึ่งกำหนดหน้าของฮาร์ดแวร์) โดยมีราคาต้นทุนรวมของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ต่ำกว่า 20,000 บาทต่อชุด (ซึ่งเมื่อรวมกับ 20,000 บาทสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์จะต่ำกว่า 40,000 บาทต่อชุด)
- ในส่วนของซอฟต์แวร์กำหนดหน้าที่ของฮาร์ดแวร์ ทีมงานได้เขียนโปรแกรมกำหนดหน้าที่อุปกรณ์เอฟพีจีเอด้วยภาษา Verilog ซึ่งผลงานในส่วนนี้คือไฟล์กำหนดหน้าที่เอฟพีจีเอสำหรับ 16 กิจกรรมการเรียนรู้ นักศึกษาผู้ใช้ชุดทดลองสามารถโปรแกรมกำหนดหน้าที่เอฟพีจีเอที่ตัวส่งและตัวรับก่อนเริ่มปฏิบัติแต่ละการทดลอง โดยต่อเอฟพีจีเอเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB และใช้โปรแกรม Quartus II Programmer ประกอบกับไฟล์ที่ทีมงานได้พัฒนาขึ้น ซึ่งการใช้โปรแกรม Quartus II Programmer นั้นไม่ต้องเสียค่าลิขสิทธิ์ใด ๆ ทั้งสิ้น
- การจัดอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อสาธิตการใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โดยจัดทั้งหมด 3 ครั้ง (ซึ่ง 2 ครั้งแรกจัดควบคู่ไปกับการสาธิตการใช้โปรแกรมจำลองการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล) ครั้งแรกเป็นส่วนหนึ่งของงานสัมมนาทางวิชาการ ECTI-CON 2015 ที่ อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี เมื่อวันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2558 และครั้งที่ 2 จัดที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที) อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี เมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 และครั้งที่ 3 จัดที่มหาวิทยาลัยกรุงเทพ วิทยาเขตรังสิต อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี เมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2558
- สาธิตการใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลต่อผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน ได้แก่ รศ.ดร.ลัญฉกร วุฒิสถิธิกุลกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผศ.ดร.อัฐพงษ์ เทพารักษ์ษณากร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (เอไอที) และ ดร.วัชรพันธ์ สุวรรณสันติสุข คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2558

5.1.3 สรุปผลโครงการย่อยที่ 3

วัตถุประสงค์หลักของโครงการย่อยนี้ คือการนำชุดทดลองส่งข้อมูลที่ทีมงานได้สร้างขึ้นไปใช้ในการเรียนการสอนจริง โดยมีข้อสรุปผลการดำเนินงานกิจกรรมของโครงการย่อยดังต่อไปนี้

- จัดทำคู่มือกิจกรรมการเรียนรู้สำหรับทั้ง 16 กิจกรรม โดยในแต่ละกิจกรรมจะมีวัตถุประสงค์ ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้อง แบบฝึกหัดทบทวนความรู้พื้นฐาน ขั้นตอนการทดลอง (ถ้ามี) และใบงานที่นักศึกษาจะต้องเขียนตอบเพื่อส่งอาจารย์ผู้สอนเมื่อทำกิจกรรมเสร็จสิ้นในแต่ละสัปดาห์
- การจัดอบรมอาจารย์ผู้สอน ซึ่งทีมงานได้จัดอบรมแบบตัวต่อตัวที่วิทยาลัยอาชีวศึกษาทั้ง 3 แห่ง ได้แก่ วิทยาลัยเทคนิคมินบุรี วิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ และวิทยาลัยกาญจนาภิเษก มหานคร โดยได้เดินทางไปทำการพูดคุยและอบรมในช่วงเดือนตุลาคม-ธันวาคม พ.ศ. 2557
- การจัดการเรียนการสอนจริงโดยใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โดยประสานงานกับวิทยาลัยอาชีวศึกษา 3 แห่ง ผ่านอาจารย์ผู้สอนดังต่อไปนี้

(1) อ.สมณธร พุ่มพิมล วิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ (หมายเลขโทรศัพท์ 083-087-4694)

(2) อ.เอกพจน์ เขียวคล้าย วิทยาลัยกาญจนาภิเษก มหานคร (หมายเลขโทรศัพท์ 087-198-8550)

(3) อ.มนตรี ประชารัตน์ วิทยาลัยเทคนิคมินบุรี (หมายเลขโทรศัพท์ 089-481-6341)

ในภาคปลายของปีการศึกษา พ.ศ. 2557 อ.สมณธร (วิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ) และ อ.เอกพจน์ (วิทยาลัยเทคนิคกาญจนาภิเษก มหานคร) เป็นผู้ทำการสอนวิชาระบบสื่อสารดิจิทัล ด้วยตนเอง แต่เนื่องจากวิทยาลัยเทคนิคมินบุรี ไม่เปิดสอนวิชาระบบสื่อสารดิจิทัล และไม่มี อ. ที่เชี่ยวชาญในสาขานี้โดยตรง อ.มนตรี ซึ่งสอนวิชาที่ใกล้เคียงได้แก่อิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม จึงเปิดให้ทีมงานเข้าทำการสอนแก่นักศึกษาในวิชาอิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม โดยทำการสอนเป็นเวลา 3 ครั้ง (ใน 3 สัปดาห์) และนำนักศึกษาทำการทดลองเพียงครั้งเดียว ทั้งนี้เนื่องจากนักศึกษาไม่มีความรู้พื้นฐานพอที่จะทำการทดลองที่เหลือ

สำหรับวิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ และวิทยาลัยเทคนิคกาญจนาภิเษก มหานคร ซึ่งมีการเรียนการสอนวิชาระบบสื่อสารดิจิทัลเต็มภาคเรียน ทีมงานได้มอบแบบทดสอบประเมินความรู้พื้นฐานให้แก่อาจารย์ผู้สอนเพื่อวัดระดับความรู้ก่อนและหลังการใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล

5.2 อภิปรายผล

โครงการวิจัยนี้ได้พัฒนาสื่อการเรียนรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล โดยมีทั้งประเภทโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) และชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) ด้วยความมุ่งหมายที่จะลดปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์การทดลองในประเทศไทย เพื่อช่วยสร้างความรู้พื้นฐานที่เข้มแข็งเกี่ยวกับเทคโนโลยีดิจิทัล

จากผลการประเมินและความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่านต่อสื่อการเรียนรู้ที่ถูกพัฒนาขึ้น พบว่าจุดเด่นของสื่อการเรียนรู้ที่ถูกพัฒนาขึ้น คือใช้งานง่าย และช่วยให้นักศึกษาได้เห็นภาพของสัญญาณข้อมูลอย่างชัดเจน ซึ่งจะช่วย

เสริมความเข้าใจจากการเรียนรู้ในห้องเรียนและการอ่านตำราได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ เนื่องจากยังมีประเด็นที่เกี่ยวข้องกับระบบสื่อสารแบบดิจิทัลอีกหลายประเด็นที่สื่อการเรียนรู้ในโครงการนี้ยังไม่ครอบคลุม เช่น การแสดงผลกระทบจากสัญญาณรบกวน และการเปลี่ยนสื่อกายภาพจากสายส่งเป็นแบบไร้สาย จึงเห็นสมควรให้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการพัฒนาในอนาคตสามารถร่วมมือกับคณาจารย์ในสถาบันการศึกษาอื่น ๆ ที่สนใจได้

จากการประเมินด้วยแบบสอบถามผู้เข้าอบรมเชิงปฏิบัติการที่ได้ใช้โปรแกรมจำลองผลการทดลองและชุดทดลองพบว่าผู้เข้าอบรมส่วนมากเห็นตรงกับผู้ทรงคุณวุฒิว่าจุดเด่นของสื่อการเรียนรู้ในโครงการวิจัยนี้ คือสามารถใช้งานได้ง่าย นอกจากนั้นผู้เข้าอบรมส่วนมากเห็นว่าสื่อการเรียนรู้ที่ถูกพัฒนาขึ้นจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการเรียนการสอนวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล และเห็นว่าเป็นประโยชน์ถ้าถูกนำไปใช้ในสถาบันของตน

การประเมินผลการประยุกต์ใช้ชุดทดลองในการเรียนการสอนพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล โดยอิงจากผลการสอบประเมินระดับความรู้พื้นฐาน และความสมบูรณ์ของใบงาน พบว่าการใช้ชุดทดลองสามารถช่วยเพิ่มคะแนนสอบประเมินระดับความรู้พื้นฐานได้ในระดับหนึ่ง และความสมบูรณ์ของใบงานอยู่ในระดับที่น่าพอใจ นอกจากนี้ ความเห็นจากอาจารย์ผู้สอนสะท้อนให้เห็นประโยชน์ของชุดทดลองในการเรียนการสอนจริง โดยเฉพาะการสร้าง ความสนใจ และความกระตือรือร้นในการเรียนรู้วิชาการสื่อสารแบบดิจิทัล สำหรับอาจารย์ที่มีประสบการณ์ใช้ชุดทดลองจากต่างประเทศ ได้ให้ความเห็นว่าชุดทดลองที่ถูกพัฒนาขึ้นในโครงการนี้ สามารถนำมาทดแทนกันได้ในการเรียนการสอน และสมควรที่จะพัฒนาต่อเนื่องในเชิงพาณิชย์ต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัยเพื่อนำไปใช้

สื่อการเรียนรู้ที่ถูกพัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ในหลายลักษณะดังต่อไปนี้

1. เผยแพร่การใช้สื่อการเรียนรู้ทั้งในประเภทโปรแกรมจำลองผลการทดลอง (ซอฟต์แวร์) และชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) ในสถาบันการศึกษา และองค์กรอื่น ๆ ที่สนใจในองค์ความรู้พื้นฐานของการสื่อสารแบบดิจิทัล ทั้งในการสอนและในงานวิจัยและพัฒนา
ตัวอย่างเช่น ทีมงานได้จัดอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่อง “ระบบสื่อสารแบบดิจิทัลประเภท software defined” ให้กับสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (GISTDA) ที่ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ในวันที่ 30 กันยายน 1 ตุลาคม และ 15-16 ตุลาคม พ.ศ. 2558
2. พัฒนาต่อยอดสื่อการเรียนรู้เพื่อใช้สร้างนวัตกรรมการเกี่ยวกับพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัลให้แก่เยาวชนและประชาชนผู้สนใจทั่วไป เพื่อเพิ่มความรู้ความเข้าใจพื้นฐานของเทคโนโลยีดิจิทัล
ตัวอย่างเช่น ทีมงานได้รับจัดสรรเงินสนับสนุน จากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (กทปส.) ภายใต้การกำกับดูแลของ กรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) เมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม

พ.ศ. 2558 เพื่อสร้างนิทรรศการเชิงปฏิสัมพันธ์ (interactive exhibit) เรื่องการสื่อสารแบบดิจิทัล โดยจะจัดแสดงที่จัตุรัสวิทยาศาสตร์ ชั้น 4 จามจุรีแคว้น ตั้งแต่วันที่ 21 กันยายน พ.ศ. 2559 ถึงวันที่ 21 กันยายน พ.ศ. 2560 โดยในปัจจุบันทีมงานกำลังทำงานร่วมกับองค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ (อพวช.) เพื่อจัดเตรียมนิทรรศการดังกล่าว

3. พัฒนาต่อยอดสื่อการเรียนรู้โดยร่วมมือกับคณาจารย์ในสถาบันศึกษาอื่น ๆ ตามความสนใจ โดยสามารถเริ่มจากการจัดสัมมนาอบรมเชิงปฏิบัติการในสถานที่ต่าง ๆ เพื่อเปิดโอกาสให้อาจารย์ผู้สนใจได้รู้จักกับการพัฒนาสื่อการเรียนรู้ขึ้นเองในประเทศ และสร้างความร่วมมือในการพัฒนาร่วมกันในอนาคต
4. สำหรับโปรแกรมจำลองผลการทดลอง สามารถนำไปใช้เป็นส่วนการเรียนรู้ทางไกล (e-learning) เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถทำการทดลองผ่านโปรแกรมเบราว์เซอร์ได้ ทำให้ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องสถานที่สำหรับการจำลองผลการทดลอง

5.3.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

โครงการวิจัยนี้มุ่งพัฒนาสื่อการเรียนรู้ และการทดลองนำไปใช้จริงในสถานศึกษา โดยจัดเป็นโครงการวิจัยแรกของทีมงานในลักษณะดังกล่าว จากประสบการณ์ที่ได้รับ ความเห็นและข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เข้าอบรมเชิงปฏิบัติการ และอาจารย์ผู้นำชุดทดลองไปใช้จริง สามารถนำมาสรุปเป็นข้อเสนอแนะในโครงการวิจัยครั้งต่อไปดังนี้

1. ในส่วนของเนื้อหาของสื่อการเรียนรู้ สามารถต่อยอดให้เห็นประเด็นเพิ่มเติม เช่นการแสดงผลกระทบของสัญญาณรบกวนต่ออัตราผิดพลาดของบิตข้อมูลที่ตัวรับรับได้ การเปลี่ยนสื่อกายภาพจากสายส่งเป็นแบบไร้สาย เป็นต้น
2. ในส่วนของการประเมินประสิทธิภาพของการนำสื่อการเรียนรู้ไปใช้ สามารถทำให้บ่อยครั้งขึ้น เช่นก่อนและหลังแต่ละกิจกรรมรายสัปดาห์ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีปริมาณมากขึ้นและเฉพาะเจาะจงยิ่งขึ้น
3. ในส่วนของการจัดทำเอกสารคู่มือการใช้สื่อการเรียนรู้ สามารถเขียนในลักษณะเป็นมอดูล (module) แทนที่จะเป็นเล่มเดียวเพื่อวิชาใดวิชาหนึ่งโดยเฉพาะ ทั้งนี้เพื่อให้อาจารย์ผู้สอนสามารถเลือกนำไปใช้ได้ตามความเหมาะสม ทั้งในระดับอาชีวศึกษาและในระดับอุดมศึกษา

ภาคผนวก

ตารางแสดงการบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

หลังจากการดำเนินโครงการวิจัยตั้งแต่วันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2557 เป็นระยะเวลา 15 เดือน ทีมงานได้ปฏิบัติงานเสร็จสิ้นทุกขั้นตอนสำหรับโครงการย่อยทั้ง 3 โครงการ ทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ของแผนงานวิจัยที่ได้ตั้งไว้ในข้อเสนอโครงการดังต่อไปนี้

1. เพื่อออกแบบการทดลองและสร้างโปรแกรม (ซอฟต์แวร์) จำลองการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล โดยครอบคลุมถึงวิธีการส่งข้อมูลพื้นฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย
2. เพื่อพัฒนาชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) สำหรับการส่งข้อมูลแบบดิจิทัลในสภาพแวดล้อมจริง ด้วยราคาต้นทุนที่ไม่สูงนักเมื่อเทียบกับการสั่งซื้อจากต่างประเทศ
3. เพื่อพัฒนาการเรียนการสอนพื้นฐานการส่งข้อมูลแบบดิจิทัลในระดับอาชีวศึกษา โดยประสานงานกับวิทยาลัยอาชีวศึกษา 3 แห่ง เพื่อพัฒนาสื่อการสอนและทดลองใช้จริงกับนักศึกษาของวิทยาลัย

โดยโครงการบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวด้วยการสำเร็จผลที่คาดว่าจะได้ในสัญญาเงินทุนอุดหนุนการวิจัย ตามตารางเวลาต่อไปนี้

ระยะเวลา	กิจกรรม	ผลที่คาดว่าจะได้	เดือนที่แล้วเสร็จ
6 เดือน ที่ 1	- ออกแบบกิจกรรมการทดลอง โดยประสานงานกับอาจารย์ผู้สอน - เขียนโปรแกรม (ซอฟต์แวร์) การทดลองส่งข้อมูล - สร้างชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) โดยใช้ FPGA	- โปรแกรม (ซอฟต์แวร์) จำลองผลการทดลองและสาธิตการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล - ชุดทดลอง (ฮาร์ดแวร์) การส่งข้อมูลแบบดิจิทัล - คู่มือการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล ซึ่งใช้ได้สำหรับการเรียนการสอนระดับอาชีวศึกษาขึ้นไป	ม.ค. 58 ธ.ค. 57 ธ.ค. 57
6 เดือน ที่ 2	- ประเมินและปรับปรุงโปรแกรมและชุดทดลอง - จัดสัมมนาอบรมอาจารย์ผู้สอน - จัดการเรียนการสอนโดยใช้ชุดทดลอง - จัดการบรรยายเพื่อสาธิตการใช้ชุดทดลอง - ประเมินผลโดยรวมและจัดทำรายงานสรุป	- งานสัมมนาอบรมอาจารย์ผู้สอน - การเรียนการสอนจริงโดยใช้การทดลอง - รายงานสรุปโครงการ	ธ.ค. 57 เม.ย. 58 ต.ค. 58

บทความสำหรับการเผยแพร่

บทความทางวิชาการที่ทีมงานได้นำเสนอและตีพิมพ์จากผลงานในโครงการนี้ มีดังต่อไปนี้ โดยตัวบทความทั้งหมดอยู่ในเอกสารแนบ ฉ

1. ชื่อบทความ: Software defined communication labs using the audio interface of laptop computers
ชื่อผู้แต่ง: Poompat Saengudomlert and Pakorn Ubolkosold
งานสัมมนาทางวิชาการ: การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON37)
สถานที่และเวลา: อ.เมือง จ.ขอนแก่น วันที่ 19–21 พฤศจิกายน พ.ศ. 2557
2. ชื่อบทความ: Development of software defined communication systems for improving technical education in Thailand
ชื่อผู้แต่ง: Poompat Saengudomlert, Natthaphob Nimpitiwan, and Pakorn Ubolkosold
งานสัมมนาทางวิชาการ: International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications 2016 (ITC-CSCC 2016)
สถานที่และเวลา: Okinawa, Japan, 10–13 July 2016
3. ชื่อบทความ: Interactive browser-based digital communications laboratory
ชื่อผู้แต่ง: Pakorn Ubolkosold, Poompat Saengudomlert, and Natthaphob Nimpitiwan
งานสัมมนาทางวิชาการ: International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications 2016 (ITC-CSCC 2016)
สถานที่และเวลา: Okinawa, Japan, 10–13 July 2016

การนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

แนวทางการดำเนินงานต่อเนื่องในอนาคตเพื่อนำผลการวิจัยไปใช้ให้เกิดประโยชน์มีดังต่อไปนี้

1. เผยแพร่การใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลเพื่อช่วยในการเรียนการสอน หรือในงานวิจัยและพัฒนา ในสาขาที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารแบบดิจิทัล ในสถาบันการศึกษาและองค์กรอื่น ๆ เช่น จัดอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง “ระบบสื่อสารแบบดิจิทัลประเภท software defined” ให้กับสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (สทอภ. หรือ GISTDA) ที่ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ในวันที่ 30 กันยายน 1 ตุลาคม และ 15-16 ตุลาคม พ.ศ. 2558

2. พัฒนาต่อระบบสื่อสารแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (software defined) เพื่อใช้สร้างนิทรรศการเชิงปฏิสัมพันธ์ (interactive exhibit) เรื่องการสื่อสารแบบดิจิทัล โดยทีมงานได้รับจัดสรรเงินสนับสนุน จากกองทุนวิจัยและพัฒนาโครงการกระจายเสียง กิจกรรมโทรทัศน์ และกิจกรรมโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (กทปส.) ภายใต้การกำกับดูแลของ กรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) เมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 ซึ่งจะต้องดำเนินการแล้วเสร็จภายในเดือน กันยายน พ.ศ. 2559 และจัดแสดงนิทรรศการดังกล่าวที่จัตุรัสวิทยาศาสตร์ ชั้น 4 จามจุรีเสกสรรค์ เป็นเวลา 1 ปี โดยในปัจจุบันทีมงานกำลังทำงานร่วมกับองค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ (อพวช.) เพื่อจัดเตรียมนิทรรศการดังกล่าว
3. พัฒนาชุดทดลองอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มความสามารถในด้านอื่น ๆ เช่นการส่งบิตข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสง และการส่งผ่านสายอากาศแบบไร้สาย โดยทีมงานได้รับจัดสรรเงินสนับสนุน จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ในเดือน มีนาคม พ.ศ. 2559 ให้ดำเนินโครงการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาชุดเครื่องมือการเรียนรู้การสื่อสารแบบดิจิทัลผ่านเส้นใยนำแสงและผ่านสายอากาศ” มีระยะเวลาโครงการ 1 ปี
4. นำระบบสื่อสารแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ไปใช้เป็นเครื่องมือในการวิจัยและพัฒนาการสื่อสารแบบใหม่ ๆ เช่น การสาธิตพิพิธภัณฑ์อัจฉริยะที่ใช้การส่งบิตข้อมูลผ่านแสงส่องสว่าง (visible light communications) ในบทความต่อไปนี้
 ชื่อบทความ: การประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารแบบกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ในการส่งข้อมูลผ่านหลอดแอลอีดี สำหรับพิพิธภัณฑ์อัจฉริยะ
 ชื่อผู้แต่ง: ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ คาร์ล สตาเกต์ วาเลนต์ มูฮัมหมัด ณัฐภพ นิยมปิตินัน และ ปกรณ์ ยุบลโกศล
 งานสัมมนาทางวิชาการ: การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON38)
 สถานที่และเวลา: อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา วันที่ 18-20 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ericsson's News Center, "Mobile data traffic surpasses voice," 23 March 2010 (หาดูได้จาก www.ericsson.com/news/1396928)
- [2] จากการประชุมแลกเปลี่ยนความรู้และลงนามข้อตกลงทางวิชาการ ระหว่าง มหาวิทยาลัยกรุงเทพ และวิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี วิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชูทิศ และวิทยาลัยกาญจนาภิเษก มหานคร วันที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2556 ณ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ วิทยาเขตรังสิต
- [3] Keysight Technologies, "Digital Modulation Techniques Teaching Solution" (หาดูได้จาก www.keysight.com/main/editorial.jsp?cc=TH&lc=eng&ckey=2581479&id=2581479)
- [4] National Instrument's Academic Product Bundles, "NI Digital Communications Teaching Bundle hands-on experimentation in RF and communications" (หาดูได้จาก sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/210087)
- [5] FUTURE TECH, www.futuretechinstruments.com
- [6] Thaiamp, www.thaiamp.com/old/Product/Products_ASK_FSK.htm
- [7] Siam Advantech, www.siamadvantech.com/eletronic1.htm
- [8] MATLAB, www.mathworks.com/products/matlab
- [9] แนวหน้า, "ล้วงกระเป๋ากองทุน กปปส. ขุมทรัพย์หมื่นล้านวงการสื่อสาร," 28 ตุลาคม พ.ศ. 2557 (หาดูได้จาก <http://www.naewna.com/scoop/128021>)
- [10] Washington Post, "The flip: Turning a classroom upside down," Washington Post, 4 June 2012
- [11] J.G. Proakis, M. Salehi, and G. Bauch, Contemporary Communication Systems Using MATLAB, 3rd Edition, Cengage Learning, 2012
- [12] W.Y. Yang et al., MATLAB/Simulink for Digital Communication, A-Jin Publisher, 2009
- [13] M. Dillinger, K. Madani, and N. Alonistioti, Software Defined Radio, Wiley, 2003
- [14] Altera, www.altera.com/products/fpga.html
- [15] Xilinx, www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga
- [16] สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา (สอศ.) www.vec.go.th/เกี่ยวกับสอศ/หลักสูตรอาชีวศึกษา/ประเภทวิชาอุตสาหกรรม.aspx
- [17] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและกำลังคนอาชีวศึกษา techno.vec.go.th/Default.aspx?tabid=659
- [18] กระทรวงศึกษาธิการ คู่มือการประกันคุณภาพภายในของสถานศึกษาอาชีวศึกษา สำนักมาตรฐานการอาชีวศึกษาและวิชาชีพ สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา พ.ศ. 2555
- [19] Y. Linn, "An ultra low cost wireless communications laboratory for education and research," IEEE Transactions on Education, vol. 55, no. 2, pp. 169–179, May 2012

- [20] GNU Octave, www.gnu.org/software/octave
- [21] A. Kara et al., "A web based training module for teaching digital communications," in Proc. International Engineering Education Conference, 2010
- [22] JavaScript, www.javascript.com
- [23] Terasic, "Altera DE0 board," [www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl? Language=English&No=364](http://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&No=364)
- [24] Altera, "Quartus II Web Edition v12.1," <https://wl.altera.com/download/software/quartus-iiwe/12.1>
- [25] ข่าวสารหน่วยงานภาครัฐ, "กัณยานนั้กระทรวงดิจิทัลเฒ่แณ่," 10 มัถุนายน พ.ศ. 2559, www.egov.go.th/th/content/10301/2592

เอกสารแนบ

- ก. แบบสอบถามผู้เข้าอบรมเชิงปฏิบัติการใช้สื่อการเรียนรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล
- ข. แบบทดสอบที่ 1 และ 2 สำหรับวัดความรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล ก่อนและหลังการใช้ชุดทดลอง
- ค. แบบประเมินชุดทดลองและโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลแบบดิจิทัลโดยผู้ทรงคุณวุฒิ
- ง. หน้าแรกของคำขอรับอนุสิทธิบัตร ยื่นต่อกรมทรัพย์สินทางปัญญา
- จ. คู่มือกิจกรรมการเรียนรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล
- ฉ. บทความสำหรับการเผยแพร่

เอกสารแนบ ก

แบบสำรวจความเห็นต่อสื่อการเรียนรู้พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล

ส่วนที่ 1: โปรแกรมจำลองผลการทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (ซอฟต์แวร์)

โปรดใส่เครื่องหมาย ✓ ในช่องที่เหมาะสม

หัวข้อ	เห็นด้วย มาก	เห็นด้วย	เห็นด้วย บางส่วน	ไม่เห็น ด้วย
ใช้งานง่าย สำหรับนักศึกษา				
ใช้งานง่าย สำหรับอาจารย์ผู้สอน				
ช่วยให้ นักเรียน นักศึกษา เห็นภาพและเข้าใจหลักการของ การสื่อสารแบบดิจิทัลมากขึ้น				

ความเห็นเพิ่มเติม/ข้อเสนอแนะ

ส่วนที่ 2: ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (ฮาร์ดแวร์)

โปรดใส่เครื่องหมาย ✓ ในช่องที่เหมาะสม

หัวข้อ	เห็นด้วย มาก	เห็นด้วย	เห็นด้วย บางส่วน	ไม่เห็น ด้วย
ใช้งานง่าย สำหรับนักศึกษา				
ใช้งานง่าย สำหรับอาจารย์ผู้สอน				
ช่วยให้ นักเรียน นักศึกษา เห็นภาพและเข้าใจหลักการของ การสื่อสารแบบดิจิทัลมากขึ้น				
ใช้งานง่ายกว่าเมื่อเทียบกับชุดทดลองที่มีอยู่ในท้องตลาด เช่น LabVolt Agilent NI				
เหมาะสำหรับใช้งานในสถาบันของท่าน				

ความเห็นเพิ่มเติม/ข้อเสนอแนะ

เอกสารแนบ ข

สัญญาเลขที่ RDG5740028

โครงการ "การพัฒนาสื่อการเรียนการสอนพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล"

แบบประเมินความรู้ 1

แบบประเมินความรู้พื้นฐานก่อนการใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล

ศูนย์วิจัย BU-CROCCS คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

ธันวาคม พ.ศ. 2557

แบบทดสอบนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย "การพัฒนาสื่อการเรียนการสอนพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล" ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนเลขที่ RDG5740028 จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) แบบทดสอบประกอบด้วยคำถามปรนัย 20 ข้อ นศ. สามารถตอบคำถามในแต่ละข้อโดยการกากบาทหัดตัวเลือกที่คิดว่าถูกต้อง

ชื่อ _____ นามสกุล _____

สถานศึกษา _____

คำถามที่ 1 : ข้อมูลจำนวน 4 บิตจะมีความเป็นไปได้ทั้งหมดกี่แบบ

(ก) 4

(ข) 8

(ค) 16

(ง) 32

คำถามที่ 2 : บริษัทแห่งหนึ่งมีพนักงาน 60 คน ถ้าต้องการตั้งหมายเลขประจำตัวพนักงานให้ไม่ซ้ำกัน และเก็บค่าหมายเลขพนักงานแต่ละคนด้วยบิตข้อมูลจำนวน N บิต ค่าที่น้อยที่สุดของ N คือ

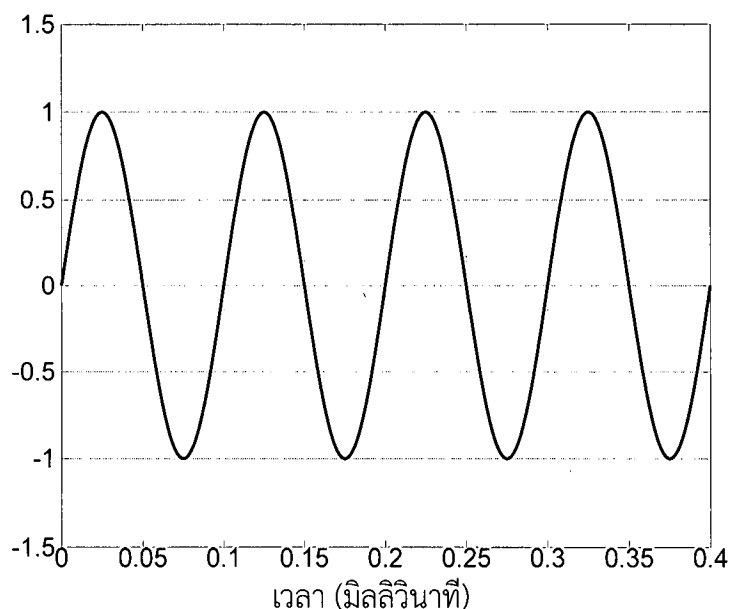
(ก) 4

(ข) 5

(ค) 6

(ง) 7

คำถามที่ 3 : สัญญาณรูป Sine ในรูปข้างล่างนี้ มีความถี่เท่ากับ



(ก) 10 Hz

(ข) 100 Hz

(ค) 1 kHz

(ง) 10 kHz

คำถามที่ 4 : อุปกรณ์สร้างสัญญาณแอนะล็อกที่ถูกส่งผ่านสื่อจากสัญญาณดิจิทัลเรียกว่า

(ก) ADC

(ข) DAC

(ค) ACDC

(ง) DCAC

คำถามที่ 5 : กระบวนการแปลงบิตข้อมูลเป็นรูปคลื่นสัญญาณเรียกว่า

(ก) Channel coding

(ข) Channel decoding

(ค) Modulation

(ง) Demodulation

คำถามที่ 6 : สัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier signal) คือ

(ก) คลื่นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีค่าสูงสำหรับบิต 1 และมีค่าต่ำสำหรับบิต 0

(ข) คลื่นรูป Sine ที่ใช้ย้ายสัญญาณจากความถี่ต่ำ (Baseband) สู่อากาศสูง (Passband)

(ค) คลื่นที่ส่งเพื่อไปสำรวจคุณภาพของสื่อ

(ง) คลื่นที่ส่งไปพร้อมกับสัญญาณข้อมูลเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดจากการส่ง

คำถามที่ 7 : จุดประสงค์หลักของการเข้ารหัสทำ Error correction คือ

(ก) เพื่อตัวรับจะได้ตรวจจับบิตข้อมูลที่ผิดพลาดจากการส่ง

(ข) เพื่อตัวรับจะได้แก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดจากการส่ง

(ค) เพื่อตัวรับจะได้แก้ไขค่าความถี่ของคลื่นพาห์ที่ผิดพลาด

(ง) เพื่อตัวรับจะได้แก้ไขค่าเฟสของคลื่นพาห์ที่ผิดพลาด

คำถามที่ 8 : สัญญาณรูป Sine ที่มีค่าต่ำสุดเป็น -2 มีค่าสูงสุดเป็น 2 และมีความถี่ 10 Hz เขียนแทนได้ด้วย

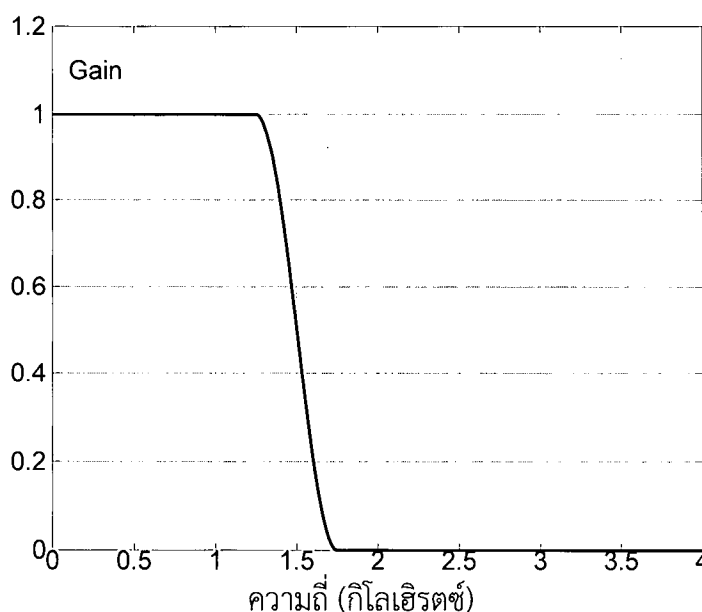
(ก) $\sin(10\pi t)$

(ข) $2 \sin(20\pi t)$

(ค) $4 \sin(20\pi t)$

(ง) $4 \sin(10\pi t)$

คำถามที่ 9 : ตัวกรองสัญญาณที่มีค่าขยายสัญญาณ (Gain) ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณดังแสดงในรูปข้างล่าง จัดเป็นตัวกรองสัญญาณประเภทใด



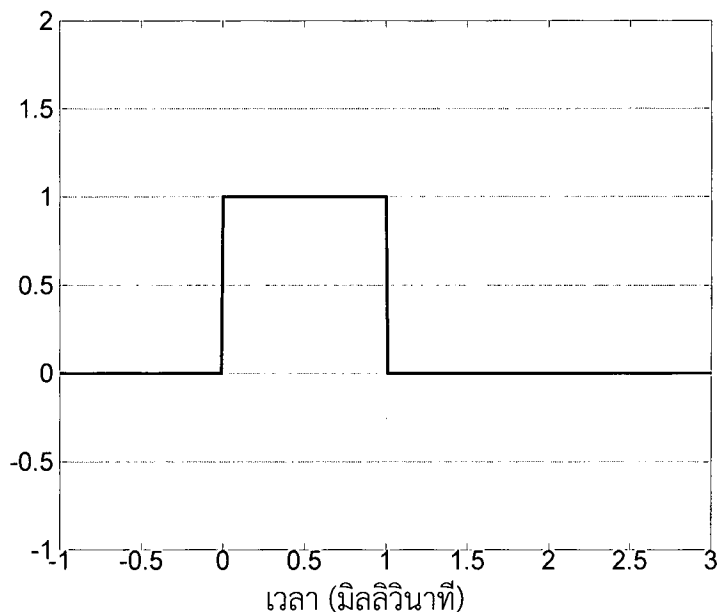
(ก) Lowpass

(ข) Highpass

(ค) Bandpass

(ง) Bandstop

คำถามที่ 10 : สำหรับการส่งบิตข้อมูลโดยใช้พัลส์ (Pulse) รูปสี่เหลี่ยมในรูปข้างล่าง ถ้าหากเราป้อนพัลส์เพียงพัลส์เดียวผ่านตัวกรอง Matched filter ที่ตัวรับ จะได้ว่าสัญญาณผลลัพธ์มีรูปร่างแบบใด



- (ก) สี่เหลี่ยมผืนผ้า (ข) สี่เหลี่ยมคางหมู (ค) สามเหลี่ยมหน้าจั่ว (ง) เกาส์เซียน (Gaussian)

คำถามที่ 11 : การส่งสัญญาณข้อมูลในรูปแบบใด จะต้องใช้ความถี่ของคลื่นพาห่มากกว่าหนึ่งค่า

- (ก) ASK (ข) FSK (ค) PSK (ง) QPSK

คำถามที่ 12 : การส่งสัญญาณข้อมูลในรูปแบบใด ไม่ต้องอาศัยคลื่นพาห่

- (ก) PSK (ข) FSK (ค) PAM (ง) QAM

คำถามที่ 13 : การส่งข้อมูลจำนวน 10 บิตทุก ๆ 1 มิลลิวินาที จะมีอัตราบิตของการส่งข้อมูล (หน่วยเป็นบิตต่อวินาที หรือ bps) เท่ากับ

- (ก) 10 bps (ข) 10 kbps (ค) 10 Mbps (ง) 10 Gbps

คำถามที่ 14 : การส่งข้อมูลจำนวน 1 กิโลบิตทุก ๆ 0.1 มิลลิวินาที จะมีอัตราบิตของการส่งข้อมูลเท่ากับ

- (ก) 10 bps (ข) 10 kbps (ค) 10 Mbps (ง) 10 Gbps

คำถามที่ 15 : ในการส่งข้อมูลแบบ PPM นั้น บิตข้อมูลถูกส่งผ่านคุณสมบัติใดของสัญญาณ

- (ก) ความกว้างของพัลส์ (ข) ตำแหน่งของพัลส์ (ค) ความสูงของพัลส์ (ง) รูปร่างของพัลส์

คำถามที่ 16 : ในการส่งข้อมูลแบบ PWM นั้น บิตข้อมูลถูกส่งผ่านคุณสมบัติใดของสัญญาณ

- (ก) ความกว้างของพัลส์ (ข) ตำแหน่งของพัลส์ (ค) ความสูงของพัลส์ (ง) รูปร่างของพัลส์

คำถามที่ 17 : ข้อใดกล่าวถูกต้องสำหรับการมัลติเพล็กซ์สัญญาณข้อมูลของผู้ใช้งานสองคนแบบ TDMA

- (ก) สัญญาณทั้งสองจะไม่ทับซ้อนกันในเชิงเวลา และไม่ทับซ้อนกันในเชิงความถี่
(ข) สัญญาณทั้งสองจะทับซ้อนกันในเชิงเวลา และทับซ้อนกันในเชิงความถี่
(ค) สัญญาณทั้งสองจะไม่ทับซ้อนกันในเชิงเวลา แต่ทับซ้อนกันในเชิงความถี่
(ง) สัญญาณทั้งสองจะทับซ้อนกันในเชิงเวลา แต่ไม่ทับซ้อนกันในเชิงความถี่

คำถามที่ 18 : ข้อใดกล่าวถูกต้องสำหรับการมัลติเพล็กซ์สัญญาณข้อมูลของผู้ใช้งานสองคนแบบ FDMA

- (ก) สัญญาณทั้งสองจะไม่ทับซ้อนกันในเชิงเวลา และไม่ทับซ้อนกันในเชิงความถี่
(ข) สัญญาณทั้งสองจะทับซ้อนกันในเชิงเวลา และทับซ้อนกันในเชิงความถี่
(ค) สัญญาณทั้งสองจะไม่ทับซ้อนกันในเชิงเวลา แต่ทับซ้อนกันในเชิงความถี่
(ง) สัญญาณทั้งสองจะทับซ้อนกันในเชิงเวลา แต่ไม่ทับซ้อนกันในเชิงความถี่

คำถามที่ 19 : ข้อใดกล่าวถูกต้องสำหรับการมัลติเพล็กซ์สัญญาณข้อมูลของผู้ใช้งานสองคนแบบ CDMA

- (ก) สัญญาณทั้งสองจะไม่ทับซ้อนกันในเชิงเวลา และไม่ทับซ้อนกันในเชิงความถี่
(ข) สัญญาณทั้งสองจะทับซ้อนกันในเชิงเวลา และทับซ้อนกันในเชิงความถี่
(ค) สัญญาณทั้งสองจะไม่ทับซ้อนกันในเชิงเวลา แต่ทับซ้อนกันในเชิงความถี่
(ง) สัญญาณทั้งสองจะทับซ้อนกันในเชิงเวลา แต่ไม่ทับซ้อนกันในเชิงความถี่

คำถามที่ 20 : ข้อใดไม่ใช่ข้อดีของการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (Digital) เมื่อเทียบกับแบบแอนะล็อก (Analog)

- (ก) สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนในการรับและส่งบิตข้อมูลต่อไป
(ข) สามารถส่งข้อมูลคลื่นเสียงได้โดยไม่มีเสียงรบกวนใดๆ จากสัญญาณเสียงที่ออกมาจากคนพูด
(ค) สามารถส่งข้อมูลตัวอักษร เสียง และภาพ ไปพร้อมๆ กันในกลุ่มข้อมูล (Packet) ชุดเดียวกัน
(ง) สามารถเข้ารหัสบิตข้อมูลเพื่อให้การส่งมีความผิดพลาดต่ำลง

แบบประเมินความรู้ 2: พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล
ศูนย์วิจัย BU-CROCCS คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558

แบบทดสอบนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย "การพัฒนาสื่อการเรียนการสอนพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล" ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนเลขที่ RDG5740028 จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) แบบทดสอบประกอบด้วยคำถามปรนัย 20 ข้อ นศ. สามารถตอบคำถามในแต่ละข้อโดยการกากบาททับตัวเลือกที่คิดว่าถูกต้อง

ชื่อ _____ นามสกุล _____

สถานศึกษา _____

คำถามที่ 1 : ถ้าการส่งข้อมูลแบบ ASK มีรูปสัญญาณที่เป็นไปได้ 2 แบบสำหรับการส่งหนึ่งครั้ง ในการส่งบิตข้อมูล 20 บิต จะต้องส่งรูปสัญญาณ ASK ทั้งหมดกี่ครั้ง

- (ก) 4 (ข) 5 (ค) 10 (ง) 20

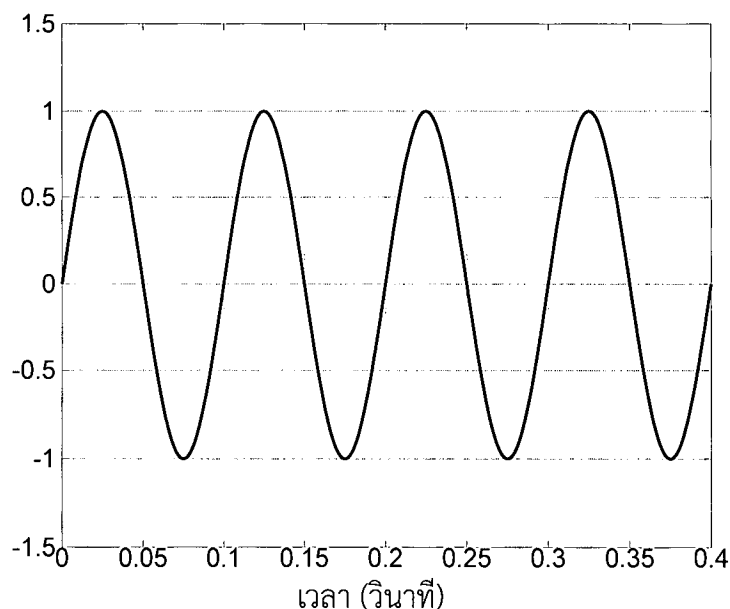
คำถามที่ 2 : ถ้าการส่งข้อมูลแบบ QPSK มีรูปสัญญาณที่เป็นไปได้ 4 แบบสำหรับการส่งหนึ่งครั้ง ในการส่งบิตข้อมูล 20 บิต จะต้องส่งรูปสัญญาณ QPSK ทั้งหมดกี่ครั้ง

- (ก) 4 (ข) 5 (ค) 10 (ง) 20

คำถามที่ 3 : การส่งบิตข้อมูลเพื่อบอกตัวรับว่าเลขท้ายสองตัวในงวดนี้เป็นตัวเลขใด (ซึ่งมีความเป็นไปได้ทั้งหมด 100 แบบตั้งแต่ 00 จนถึง 99) จะต้องส่งบิตข้อมูลอย่างน้อยกี่บิต

- (ก) 5 (ข) 6 (ค) 7 (ง) 8

คำถามที่ 4 : สัญญาณรูป Sine ในรูปข้างล่างนี้ มีความถี่เท่ากับ



- (ก) 10 Hz (ข) 100 Hz (ค) 1 kHz (ง) 10 kHz

คำถามที่ 5 : อุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนะล็อกที่ตัวรับรับได้เป็นสัญญาณดิจิทัลเรียกว่า

(ก) ADC

(ข) DAC

(ค) ACDC

(ง) DCAC

คำถามที่ 6 : ข้อใดกล่าวถึงกระบวนการ Modulation ได้อย่างถูกต้อง

(ก) เป็นการแปลงบิตข้อมูลเป็นรูปคลื่นสัญญาณ

(ข) เป็นการแปลงรูปคลื่นสัญญาณเป็นบิตข้อมูล

(ค) เป็นการเข้ารหัสบิตข้อมูลให้ตัวรับสามารถตรวจจับบิตที่ผิดพลาดได้

(ง) เป็นการเข้ารหัสบิตข้อมูลให้ตัวรับสามารถแก้ไขบิตที่ผิดพลาดได้

คำถามที่ 7 : ข้อใดกล่าวถึงสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier signal) ได้ไม่ถูกต้อง

(ก) เราสามารถส่งข้อมูลโดยการเปลี่ยนค่าแอมพลิจูด (Amplitude) ของสัญญาณนี้

(ข) เราสามารถส่งข้อมูลโดยการเปลี่ยนค่าเฟส (Phase) ของสัญญาณนี้

(ค) คลื่นรูป Sine ที่ใช้ย้ายสัญญาณจากความถี่ต่ำ (Baseband) สู่ความถี่สูง (Passband)

(ง) คลื่นที่ส่งไปพร้อมกับสัญญาณข้อมูลเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดจากการส่ง

คำถามที่ 8 : สัญญาณรูป Sine ที่มีค่าต่ำสุดเป็น -0.5 มีค่าสูงสุดเป็น 0.5 และมีความถี่ 5 Hz เขียนแทนได้ด้วย

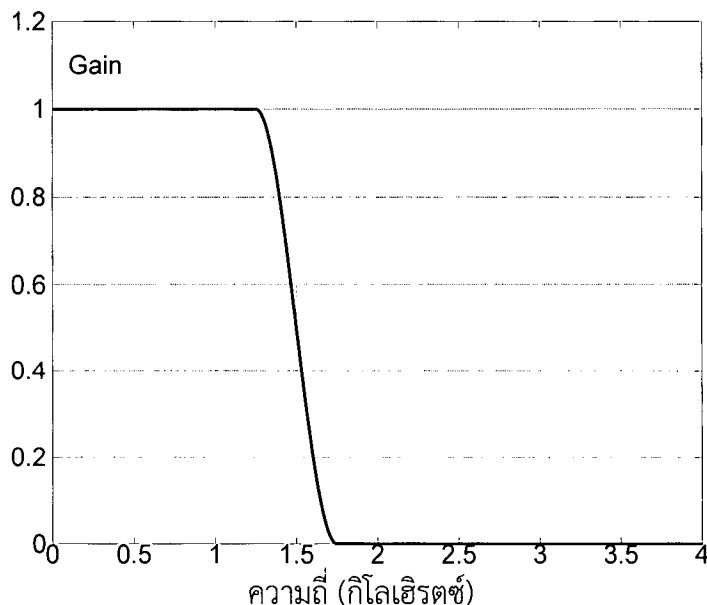
(ก) $0.5 \sin(5\pi t)$

(ข) $0.5 \sin(10\pi t)$

(ค) $\sin(5\pi t)$

(ง) $\sin(10\pi t)$

คำถามที่ 9 : ตัวกรองสัญญาณที่มีค่าขยายสัญญาณ (Gain) ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณดังแสดงในรูปข้างล่าง จะกรองความถี่ในข้อใดออกจากสัญญาณขาเข้า



(ก) 0.5 kHz

(ข) 1 kHz

(ค) 1.5 kHz

(ง) 2 kHz

คำถามที่ 10 : การส่งข้อมูลจำนวน 100 บิตทุก ๆ 1 มิลลิวินาที จะมีอัตราบิตของการส่งข้อมูลเท่ากับ

(ก) 10 kbps

(ข) 100 kbps

(ค) 1 Mbps

(ง) 10 Mbps

คำถามที่ 11 : การส่งข้อมูลจำนวน 1 กิโลบิตทุก ๆ 0.1 วินาที จะมีอัตราบิตของการส่งข้อมูลเท่ากับ

(ก) 10 bps

(ข) 10 kbps

(ค) 10 Mbps

(ง) 10 Gbps

คำถามที่ 12 : จุดประสงค์หลักของการเข้ารหัสทำ Error detection คือ

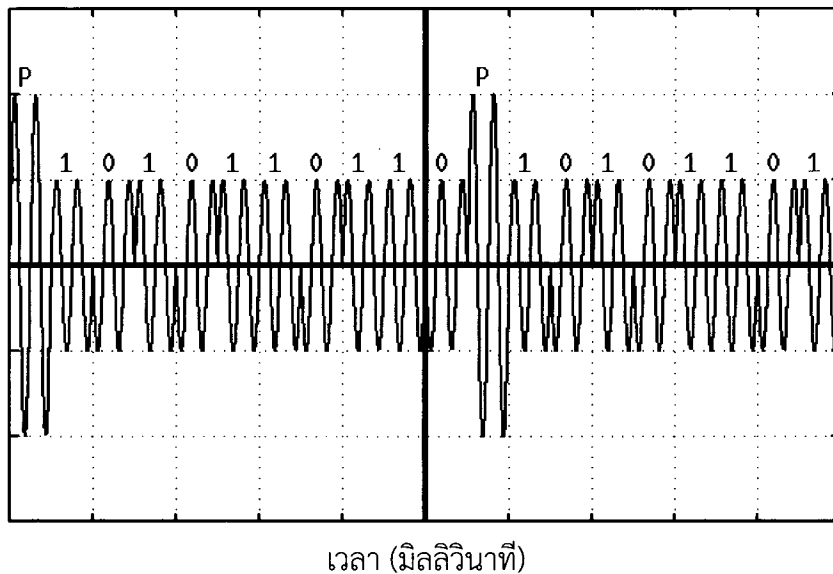
(ก) เพื่อตัวรับจะได้ตรวจจับบิตข้อมูลที่ผิดพลาดจากการส่ง

(ข) เพื่อตัวรับจะได้แก้ไขบิตข้อมูลที่ผิดพลาดจากการส่ง

(ค) เพื่อตัวรับจะได้แก้ไขค่าความถี่ของคลื่นพาห้ที่ผิดพลาด

(ง) เพื่อตัวรับจะได้แก้ไขค่าเฟสของคลื่นพาห้ที่ผิดพลาด

คำถามที่ 13 : รูปข้างล่างแสดงรูปสัญญาณที่ถูกส่งสำหรับกลุ่มบิตข้อมูล 1010110110 ซึ่งถูกส่งซ้ำ ๆ กันแบบต่อเนื่อง โดยแต่ละกลุ่มบิตถูกค้นด้วยสัญญาณ Preamble ซึ่งมีความสูงกว่าสัญญาณข้อมูล การส่งข้อมูลในรูปแบบสอดคล้องกับวิธีการใด



(ก) ASK

(ข) FSK

(ค) PSK

(ง) QAM

คำถามที่ 14 : การส่งสัญญาณข้อมูลในรูปแบบใด จำเป็นต้องอาศัยคลื่นพาห้

(ก) PAM

(ข) QAM

(ค) PWM

(ง) PPM

คำถามที่ 15 : การมัลติเพล็กซ์สัญญาณข้อมูลในรูปแบบใด จะต้องใช้ความถี่ของคลื่นพาห้มากกว่าหนึ่งค่า

(ก) TDMA

(ข) FDMA

(ค) CDMA

(ง) ถูกทุกข้อ

คำถามที่ 16 : ในการส่งข้อมูลแบบ ASK นั้น บิตข้อมูลถูกส่งผ่านคุณสมบัติใดของคลื่นพาห้

(ก) ค่าความถี่

(ข) ค่าเฟส

(ค) ค่าแอมพลิจูด

(ง) จำนวนรอบ

คำถามที่ 17 : ในการส่งข้อมูลแบบ FSK นั้น บิตข้อมูลถูกส่งผ่านคุณสมบัติใดของคลื่นพาห์

- (ก) ค่าความถี่ (ข) ค่าเฟส (ค) ค่าแอมพลิจูด (ง) จำนวนรอบ

คำถามที่ 18 : พิจารณาถึงการมัลติเพล็กซ์สัญญาณข้อมูลของผู้ใช้งานสองคน ถ้าสัญญาณทั้งสองทับซ้อนกันในเชิงเวลา แต่ไม่ทับซ้อนกันในเชิงความถี่ จะสอดคล้องกับวิธีใด

- (ก) TDMA (ข) FDMA (ค) CDMA (ง) SDMA

คำถามที่ 19 : พิจารณาถึงการมัลติเพล็กซ์สัญญาณข้อมูลของผู้ใช้งานสองคน ถ้าสัญญาณทั้งสองทับซ้อนกันในเชิงความถี่ แต่ไม่ทับซ้อนกันในเชิงเวลา จะสอดคล้องกับวิธีใด

- (ก) TDMA (ข) FDMA (ค) CDMA (ง) SDMA

คำถามที่ 20 : ข้อใดกล่าวได้ถูกต้องเกี่ยวกับการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (Digital)

- (ก) การส่งบิตข้อมูลจำเป็นต้องแปลงบิตให้อยู่ในรูปของคลื่นสัญญาณก่อนส่ง
(ข) การส่งข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับจำเป็นต้องอาศัยคลื่นพาห์อย่างน้อยหนึ่งความถี่
(ค) ถ้าเราเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห์ให้ต่ำลง จะมีผลทำให้อัตราบิตที่ถูกส่งต่ำลงไปด้วย
(ง) การเข้ารหัสบิตข้อมูลเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดก่อนส่งบิตข้อมูล สามารถลดจำนวนบิตข้อมูลที่ถูกส่งได้

เอกสารแนบ ค

สัญญาเลขที่ RDG5740028

โครงการ "การพัฒนาสื่อการเรียนการสอนพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล"

แบบประเมินชุดทดลองและโปรแกรมการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล

ผู้ประเมิน

หน่วยงานต้นสังกัด

ส่วนที่ 1: ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล

โปรดใส่เครื่องหมาย ✓ ในช่องที่เหมาะสม

คุณสมบัติ	มาก ที่สุด	มาก	ปานกลาง	น้อย	น้อย ที่สุด
เนื้อหาเหมาะสมกับวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล					
ความง่ายของการใช้งานมีความเหมาะสมกับนักศึกษา					
ผลงานมีคุณภาพเพียงพอสำหรับสถานศึกษา					

ความเห็นเพิ่มเติม (อาจใช้เอกสารแนบ)

ข้อเสนอแนะ (อาจใช้เอกสารแนบ)

ส่วนที่ 2: โปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลแบบดิจิทัล

โปรดใส่เครื่องหมาย ✓ ในช่องที่เหมาะสม

คุณสมบัติ	มาก ที่สุด	มาก	ปานกลาง	น้อย	น้อย ที่สุด
-----------	---------------	-----	---------	------	----------------

เนื้อหาเหมาะสมกับวิชาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล

ความยากง่ายของการใช้งานมีความเหมาะสมกับนักศึกษา

ผลงานมีคุณภาพเพียงพอสำหรับสถานศึกษา

ความเห็นเพิ่มเติม (อาจใช้เอกสารแนบ)

ข้อเสนอแนะ (อาจใช้เอกสารแนบ)

ลายมือชื่อ _____
(.....)

วันที่ _____

ทีมงานวิจัยและพัฒนาขอขอบพระคุณที่ท่านกรุณาสละเวลาในการประเมินผลงาน

 คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ☐ การประดิษฐ์ ☐ การออกแบบผลิตภัณฑ์ ☒ อนุสิทธิบัตร ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ.2522 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่2) พ.ศ.2535 และพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่3) พ.ศ.2542	สำหรับเจ้าหน้าที่	
	วันรับคำขอ 6 มิ.ย. 2558	เลขที่คำขอ
	วันยื่นคำขอ 6 มิ.ย. 2558	1503001694
	สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	
	ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์ ประเภทผลิตภัณฑ์	
	วันประกาศโฆษณา	เลขที่ประกาศโฆษณา
	วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร
	ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่	
1.ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลเชิงปฏิสัมพันธ์เพื่อศึกษาการสื่อสารแบบดิจิทัล		
2.คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์ถูกยกเว้นเป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างใดอย่างหนึ่งและเป็นคำขอลำดับที่ 1 ในจำนวน 1 คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน		
3.ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรและที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย 979/17-21 ชั้น 14 SM Tower ถ.พหลโยธิน แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กทม. 10400		
3.1 สัญชาติ ไทย 3.2 โทรศัพท์ 0-2278-8204 3.3 โทรสาร 0-2298-0476 3.4 อีเมล worawanninee@trf.or.th		
4.สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ☐ ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ ☒ ผู้รับโอน ☐ ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น		
5.ตัวแทน (ถ้ามี)/ที่อยู่ (เลขที่ ถนน จังหวัด รหัสไปรษณีย์) นางวรรณิณี เต็งสุวรรณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย 979/17-21 ชั้น 14 SM Tower ถ.พหลโยธิน แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กทม. 10400		
5.1 ตัวแทนเลขที่ 2306 5.2 โทรศัพท์ 0-2278-8204 5.3 โทรสาร 0-2298-0476 5.4 อีเมล worawanninee@trf.or.th		
6.ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ) นายภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ นายณัฐภาพ นิมปิตวิวัน และ นายปรกรณ์ ยุกตโกศล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ วิทยาเขตรังสิต 9/1 หมู่ 5 ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 ประเทศไทย		
7.คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตร เลขที่ วันยื่น เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ ☐ คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง ☐ ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ ☐ ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ		

หมายเหตุ ใบกรณีที่ไม่อาจจะระบุรายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

คู่มือกิจกรรมการเรียนรู้ พื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล



ศูนย์วิจัย BU-CROCCS
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

มิถุนายน พ.ศ. 2559

สารบัญ

บทนำ	v
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบสื่อสารแบบดิจิทัล	vi
1 สัญญาณพื้นฐานและคุณสมบัติ	1
1.1 วัตถุประสงค์	1
1.2 ความรู้พื้นฐาน	1
1.3 การเขียนสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงสัญญาณ	4
1.4 การวาดภาพของสัญญาณจากสมการทางคณิตศาสตร์	5
2 การใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล	7
2.1 วัตถุประสงค์	7
2.2 ความรู้พื้นฐาน	7
2.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลอง	9
2.4 การโปรแกรมหน้าที่อุปกรณ์ FPGA	10
2.5 การส่งสัญญาณรูปไซน์	11
2.6 การส่งสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยม	13
2.7 การส่งสัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยม	14
3 การกรองสัญญาณเบื้องต้น	15
3.1 วัตถุประสงค์	15
3.2 ความรู้พื้นฐาน	15
3.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง	18
3.4 การกรองสัญญาณโดยใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ	19
4 การใช้ตัวกรองจับคู่	21
4.1 วัตถุประสงค์	21
4.2 ความรู้พื้นฐาน	21
4.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง	24
4.4 การกรองสัญญาณที่ตัวรับโดยใช้ตัวกรองจับคู่	25

5	การส่งบิตข้อมูลแบบ PAM	27
5.1	วัตถุประสงค์	27
5.2	ความรู้พื้นฐาน	27
5.3	แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง	29
5.4	การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PAM	30
5.5	ความจำเป็นของการทำ synchronization อย่างถูกต้อง	31
6	การส่งบิตข้อมูลแบบ PWM	33
6.1	วัตถุประสงค์	33
6.2	ความรู้พื้นฐาน	33
6.3	แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง	35
6.4	การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PWM	37
7	การส่งบิตข้อมูลแบบ PPM	38
7.1	วัตถุประสงค์	38
7.2	ความรู้พื้นฐาน	38
7.3	แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง	40
7.4	การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PPM	42
8	การส่งบิตข้อมูลแบบ ASK	43
8.1	วัตถุประสงค์	43
8.2	ความรู้พื้นฐาน	43
8.3	แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง	45
8.4	การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ ASK	46
9	การส่งบิตข้อมูลแบบ FSK	48
9.1	วัตถุประสงค์	48
9.2	ความรู้พื้นฐาน	48
9.3	แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง	50
9.4	การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ FSK	51
10	การส่งบิตข้อมูลแบบ PSK	53
10.1	วัตถุประสงค์	53
10.2	ความรู้พื้นฐาน	53
10.3	แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง	55
10.4	การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ BPSK	56
11	การส่งบิตข้อมูลแบบ QAM (ตอนที่ 1/2)	58
11.1	วัตถุประสงค์	58
11.2	ความรู้พื้นฐาน	58
11.3	การแสดงบิตข้อมูลด้วยสัญญาณแบบ QPSK	60

11.4	การอ่านบิตข้อมูลและการแยกส่วนประกอบของสัญญาณ QPSK	61
12	การส่งบิตข้อมูลแบบ QAM (ตอนที่ 2/2)	63
12.1	วัตถุประสงค์	63
12.2	ความรู้พื้นฐาน	63
12.3	การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ QPSK	64
12.4	การใช้ค่าสัญญาณ QAM ใน Constellation diagram	67
13	การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA และ FDMA	69
13.1	วัตถุประสงค์	69
13.2	ความรู้พื้นฐาน	69
13.3	แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง	72
13.4	การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับโดยการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA และ FDMA	74
14	การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA	77
14.1	วัตถุประสงค์	77
14.2	ความรู้พื้นฐาน	77
14.3	แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง	79
14.4	การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับโดยการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA	81
15	การเข้ารหัสตรวจจับข้อผิดพลาด	83
15.1	วัตถุประสงค์	83
15.2	ความรู้พื้นฐาน	83
15.3	แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง	84
15.4	การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับโดยมีการเข้ารหัสตรวจจับข้อผิดพลาด	85
16	การเข้ารหัสแก้ไขข้อผิดพลาด	87
16.1	วัตถุประสงค์	87
16.2	ความรู้พื้นฐาน	87
16.3	แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง	88
16.4	การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับโดยมีการเข้ารหัสแก้ไขข้อผิดพลาด	89

บทนำ

คู่มือกิจกรรมการเรียนรู้เล่มนี้ ที่ทีมงานวิจัยและพัฒนาในศูนย์วิจัย BU-CROCCS (Bangkok University-Center of Research in Optoelectronics, Communications, and Control Systems) ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ จัดทำขึ้นพร้อมกับชุดทดลองเพื่อศึกษาพื้นฐานการสื่อสารแบบดิจิทัล (digital Communications) ด้วยจุดมุ่งหมายที่จะช่วยส่งเสริมให้การเรียนรู้การสอนในวิชาที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารแบบดิจิทัลในประเทศไทยนั้น มีความพร้อมในเรื่องของอุปกรณ์การทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลมากขึ้นกว่าที่เป็นอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากราคาของชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลนั้นค่อนข้างสูง ทำให้จำนวนชุดทดลองที่สถาบันการศึกษาสามารถจัดซื้อได้ภายใต้งบประมาณที่จำกัด อาจจะไม่เพียงพอให้นักศึกษาทดลองได้อย่างเต็มที่

การสร้างชุดทดลองโดยทีมงาน ใช้แนวทางการสร้างระบบสื่อสารแบบ software defined radio (หรือเรียกให้กว้างขึ้นได้เป็น software defined communications) ซึ่งมีแนวโน้มจะเป็นแนวทางหลักของการผลิตอุปกรณ์สื่อสารสมัยใหม่ ที่สามารถปรับการทำงานให้เข้ากับสภาพแวดล้อมโดยการปรับเปลี่ยนทางซอฟต์แวร์ (software) แต่ยังใช้ฮาร์ดแวร์ (hardware) ชุดเดิม ข้อได้เปรียบของแนวทาง software defined คืออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์สำหรับการประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัลหรือที่เรียกกันว่า DSP (digital signal processing) นั้น มีราคาต่ำลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้ราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตชุดทดลองนั้นมีราคาย่อมเยาเมื่อเทียบกับการสั่งซื้อจากต่างประเทศ

อย่างไรก็ตาม ชุดทดลองที่ทางทีมงานได้พัฒนาขึ้น จะมีข้อจำกัดอยู่ในเรื่องของอัตราบิต (transmission bit rate) และความถี่ของคลื่นพาห์ (carrier frequency) ซึ่งในปัจจุบัน (พ.ศ. 2557) อยู่ในระดับ 1–10 กิโลบิตต่อวินาที (kbps) และในระดับ 1–5 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ตามลำดับ แต่เนื่องจากหลักการทำงานของ การส่ง การรับ และการประมวลผลสัญญาณที่เกี่ยวข้องนั้น เป็นหลักการเดียวกันกับระบบที่มีอัตราบิตและความถี่ของคลื่นพาห์ที่สูงกว่า จึงไม่จัดเป็นข้อจำกัดที่มีผลต่อการเรียนการสอนพื้นฐานแต่อย่างใด

สุดท้ายนี้ ทีมงานหวังว่าท่านจะได้ประโยชน์จากการนำชุดทดลองและกิจกรรมที่ทางทีมงานพัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ เนื่องจากทีมงานวางแผนที่จะพัฒนาชุดทดลองอย่างต่อเนื่อง ทางทีมงานยินดีรับฟังข้อเสนอจากผู้ใช้งาน ทั้งจากอาจารย์และจากนักศึกษา โดยท่านสามารถติดต่อทีมงานได้ผ่านทางอีเมล poompat.s@bu.ac.th

ด้วยความปรารถนาดี
รศ.ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ

ผศ.ดร.ณัฐภาพ นิมิพิติวัน

ดร.ปกรณ์ ยุบลโกศล

ดร.คาร์เรล สเตริกซ์

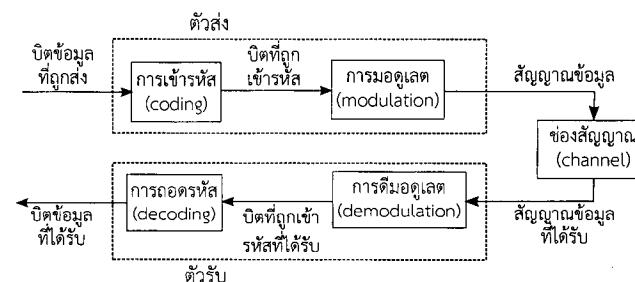
นายศรัทธญา บุญเฉลียว

(ทีมงานจากศูนย์วิจัย BU-CROCCS)

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบสื่อสารแบบดิจิทัล

โครงสร้างของระบบสื่อสาร

การสื่อสารแบบดิจิทัล (digital communications) เป็นการส่งบิตข้อมูล (data bit) ด้วยสัญญาณ (signal) จากตัวส่ง (transmitter) ไปยังตัวรับ (receiver) ผ่านช่องสัญญาณ (channel) ซึ่งอาจจะเป็นสายส่ง (transmission cable) หรือเป็นเพียงอากาศระหว่างเสาอากาศ (antenna) ที่ตัวส่งและที่ตัวรับ โครงสร้างของระบบสื่อสารแบบดิจิทัลโดยทั่วไป แสดงได้ดังรูปข้างล่างนี้



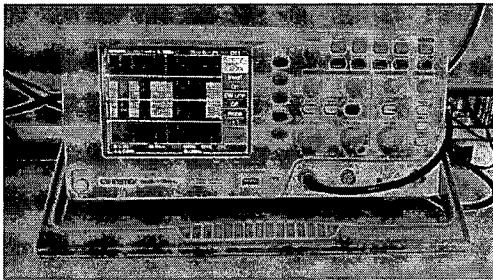
ในรูปข้างบน ตัวส่งจะส่งบิตข้อมูลจากผู้ใช้งาน (user) ซึ่งบิตข้อมูลนั้นอาจมาจากข้อมูลหลายประเภท เช่น ข้อความ (text) เสียง (audio) รูป (image) และวิดีโอ (video) เป็นต้น ขั้นตอนหลักของการส่งและรับบิตข้อมูลมีดังต่อไปนี้

- ตัวส่งอาจทำการเข้ารหัส (coding) ซึ่งเป็นการแปลงกลุ่มบิตข้อมูลให้เป็นกลุ่มบิตใหม่เพื่อจุดประสงค์ต่าง ๆ กัน ได้แก่
 - (ก) การบีบอัดข้อมูล (source coding) ให้มีจำนวนบิตที่จะต้องส่งน้อยลง
 - (ข) การเข้ารหัสช่องสัญญาณ (channel coding) เพื่อให้ตัวรับสามารถตรวจจับบิตที่ผิดพลาด (error detection) หรือแก้ไขบิตที่ผิดพลาด (error correction)
 - (ค) การเข้ารหัสลับ (encryption) เพื่อความปลอดภัยของข้อมูล
- จากนั้น ตัวส่งจะทำการมอดูเลต (modulation) ซึ่งเป็นการแปลงบิตข้อมูล (ซึ่งอาจจะถูกเข้ารหัสแล้ว) ให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก (analog) ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการเดินทางผ่านช่องสัญญาณได้

- **ช่องสัญญาณ (channel)** หมายถึงสื่อสำหรับส่งสัญญาณ (transmission medium) จากตัวส่งไปยังตัวรับ ซึ่งอาจจะเป็นแบบมีสาย หรือแบบไร้สายก็ได้ ช่องสัญญาณต่างประเภทมักจะมีคุณสมบัติต่างกัน เช่น สายเคเบิลทองแดง (copper cable) และเส้นใยนำแสง (optical fiber) จะสามารถรองรับการส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตคงที่ ในขณะที่การส่งแบบไร้สายผ่านอากาศจะมีอัตราบิตที่ไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับระยะห่างของตัวส่งและตัวรับ และสภาพอากาศ เป็นต้น
- เมื่อตัวรับได้รับสัญญาณ ก็จะประมวลผลสัญญาณในทางกลับกัน ได้แก่การ**ดีมอดูเลต (demodulation)** เพื่อแปลงสัญญาณที่ได้รับให้เป็นบิตข้อมูล (ซึ่งอาจจะถูกเข้ารหัส) ในกรณีที่บิตข้อมูลถูกเข้ารหัส ตัวรับก็จะทำการ**ถอดรหัส (decoding)** เพื่อรับบิตข้อมูลกลับคืนมา

การแสดงผลสัญญาณแอนะล็อกที่ได้จากการมอดูเลต

การมอดูเลตหรือการสร้างสัญญาณจากบิตข้อมูลนั้น สามารถทำได้หลายแบบ ซึ่งโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของช่องสัญญาณที่ใช้ส่งข้อมูล ขั้นตอนการมอดูเลตมักจะถูกนำเสนอด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแสดงค่าของสัญญาณแอนะล็อกในรูปของฟังก์ชัน (function) ในเชิงเวลา นศ. อาจจะได้ลองสร้างสัญญาณเหล่านี้ด้วย การใช้โปรแกรมคำนวณ เช่น MATLAB Octave และ Scilab เป็นต้น ถ้าสถานศึกษามีความพร้อมในเรื่องของอุปกรณ์การทดลอง นศ. ก็จะได้เห็นสัญญาณแอนะล็อกที่ถูกส่งออกมาจากตัวส่งทางหน้าจอของออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แสดงสัญญาณ ดังแสดงในรูปข้างล่าง

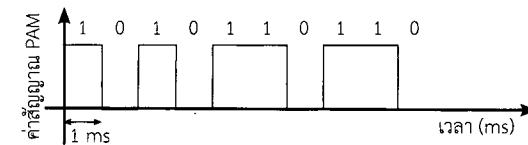


การได้เห็นสัญญาณเหล่านี้จะช่วยสร้างความมั่นใจในองค์ความรู้ของ นศ. เนื่องจาก**สิ่งที่ถูกส่งผ่านของสัญญาณในสภาพแวดล้อมจริงคือสัญญาณแอนะล็อกที่ได้จากการมอดูเลต ไม่ใช่บิตข้อมูลโดยตรง** ดังนั้น วิธีการมอดูเลตจึงเป็นพื้นฐานที่สำคัญของวิชาการสื่อสารแบบดิจิทัล ซึ่งกิจกรรมการเรียนรู้โดยใช้ชุดทดลองที่ทีมงานจัดเตรียมขึ้นมา จะแสดงให้เห็นถึงการมอดูเลตที่เป็นไปได้หลายวิธี โดยรวมเราสามารถแบ่งการมอดูเลตออกเป็น 2 ประเภท ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

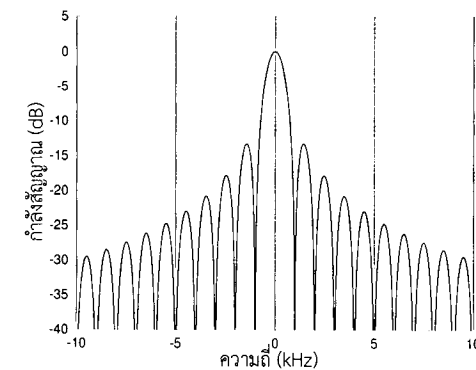
- การมอดูเลตที่แถบความถี่ฐาน (baseband modulation)
- การมอดูเลตที่แถบความถี่ผ่าน (passband modulation)

การมอดูเลตที่แถบความถี่ฐาน

การมอดูเลตที่แถบความถี่ฐาน (baseband modulation) เป็นการแปลงบิตข้อมูลให้เป็นสัญญาณที่มี**องค์ประกอบความถี่ (frequency component)** อยู่ในช่วง**ใกล้ศูนย์ (หรือฐาน)** เช่นการมอดูเลตแบบ PAM (pulse amplitude modulation) ในรูปข้างล่างที่ใช้ค่าสูงต่ำของสัญญาณส่งบิตข้อมูล 1 และ 0 ตามลำดับ จากรูปอัตราบิต (bit rate) ของการส่งข้อมูลคือ 1 บิตต่อ 1 ms (มิลลิวินาที) ซึ่งเท่ากับ 1 kbps (กิโลบิตต่อวินาที: kilobit per second)



จากรูปสัญญาณที่แสดงในเชิงเวลา (แกนนอนมีหน่วยเป็นวินาที) เราไม่สามารถเห็นคุณสมบัติของการอยู่ในแถบความถี่ฐาน รูปข้างล่างต่อไปนี้แสดงคุณสมบัติดังกล่าว โดยแสดงการกระจายกำลังของสัญญาณ (ในหน่วยเดซิเบล: dB) ที่องค์ประกอบความถี่ต่าง ๆ ของสัญญาณ PAM ในรูปที่แล้ว จัดเป็นรูปสัญญาณในเชิงความถี่ (แกนนอนมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์: Hz) จะเห็นได้ว่ากำลังของสัญญาณส่วนใหญ่จะอยู่รอบ ๆ ความถี่ศูนย์¹



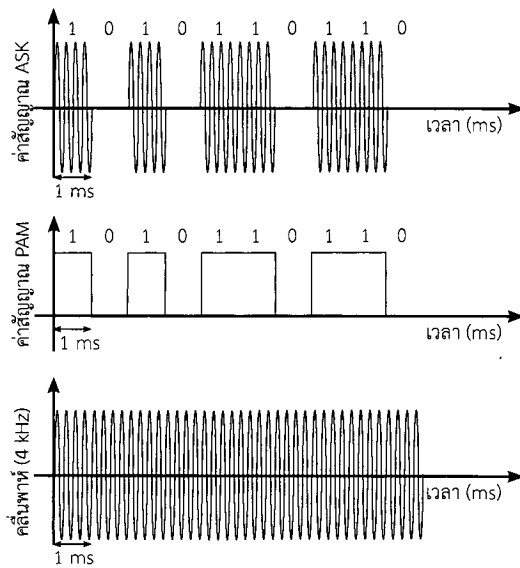
จากรูปแสดงการกระจายกำลังของสัญญาณ จะเห็นได้ว่ากำลังส่วนใหญ่ของสัญญาณจะอยู่ในช่วงที่มีความกว้างแถบความถี่ 1 kHz^2 โดยทั่วไป การส่งค่าสัญญาณ 1 ครั้งด้วยสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมในทุก ๆ ช่วงเวลา T (หน่วยเป็น s) จะใช้**ความกว้างแถบความถี่ (bandwidth)** ประมาณ $1/T$ (หน่วยเป็น Hz) นั่นหมายความว่า **ยิ่งส่งค่าสัญญาณบ่อยขึ้น (ส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตสูงขึ้น) ก็จะต้องใช้ความกว้างแถบความถี่มากขึ้นด้วย**

¹ ถึงแม้ว่าความถี่ในทางกายภาพจะมีค่าไม่ติดลบ แต่เพื่อความสะดวกทางคณิตศาสตร์ แบบจำลองของสัญญาณมักประกอบไปด้วยค่าความถี่ที่เป็นจำนวนจริงใด ๆ ไม่ว่าจะเป็นบวกหรือลบ

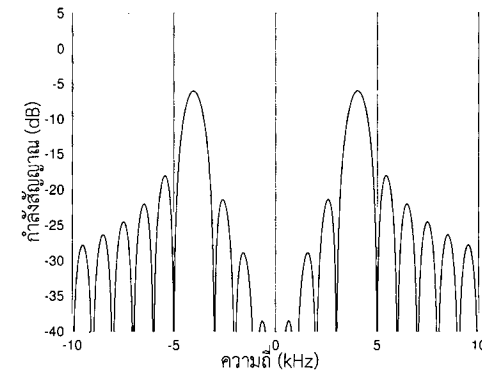
² ความกว้างแถบความถี่จะคิดจากช่วงความถี่ที่ไม่ติดลบเท่านั้น ในที่นี้คือช่วง $0-1 \text{ kHz}$

การมอดูเลตที่แถบความถี่ผ่าน

การมอดูเลตที่แถบความถี่ผ่าน (passband modulation) เป็นการแปลงบิตข้อมูลให้เป็นสัญญาณที่องค์ประกอบความถี่อยู่ในช่วงความถี่ของคลื่นพาห์ (carrier signal) เช่นการมอดูเลตแบบ ASK (amplitude shift keying) ในรูปแรกที่ใช้ค่าแอมพลิจูด (ขนาดความกว้างวัดจากค่าเฉลี่ย) มากน้อยของคลื่นพาห์ส่งบิตข้อมูล 1 และ 0 ตามลำดับ รูปที่ 3 แสดงคลื่นพาห์ที่ใช้สำหรับสร้างสัญญาณ ASK โดยความถี่ของคลื่นพาห์ (carrier frequency) เท่ากับ 4 kHz จะเห็นได้ว่าสัญญาณ ASK นั้นสร้างได้โดยการนำสัญญาณ PAM (รูปที่ 2) ที่แถบความถี่ฐานมาคูณกับคลื่นพาห์



จากรูปสัญญาณที่แสดงในเชิงเวลา เราไม่สามารถเห็นคุณสมบัติของการอยู่ในแถบความถี่ผ่าน รูปสัญญาณในเชิงความถี่ต่อไปนี้แสดงคุณสมบัติดังกล่าว โดยแสดงการกระจายกำลังของสัญญาณ ที่องค์ประกอบความถี่ต่าง ๆ ของสัญญาณ ASK ในรูปที่ 3 แล้ว จะเห็นได้ว่ากำลังของสัญญาณส่วนใหญ่จะอยู่รอบ ๆ ความถี่ของคลื่นพาห์ ซึ่งในที่นี้คือ 4 kHz



การคูณสัญญาณที่อยู่ในแถบความถี่ฐานด้วยคลื่นพาห์นั้น ทำให้องค์ประกอบความถี่ของสัญญาณเลื่อนจากความถี่ฐานเป็นความถี่ที่สูงขึ้น กระบวนการเลื่อนความถี่ให้สูงขึ้นนี้เรียกว่า up-conversion โดยค่าความถี่ของคลื่นพาห์จะขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณ เช่นการส่งผ่านเสาอากาศในระบบ WIFI จะใช้คลื่นพาห์ในระดับ 2 GHz เป็นต้น ในกรณีของการมอดูเลตที่แถบความถี่ผ่าน ตัวรับมักจะต้องเลื่อนสัญญาณกลับมาที่แถบความถี่ฐานก่อนจะประมวลผลสัญญาณต่อไป กระบวนการเลื่อนความถี่กลับลงมานี้เรียกว่า down-conversion

ประเภทของการมอดูเลตและเนื้อหาเพิ่มเติม

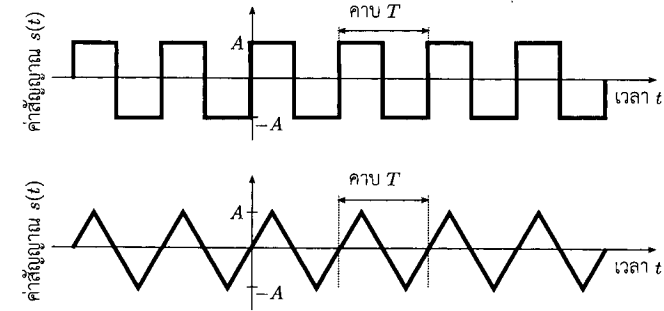
กิจกรรมการเรียนรู้ที่ทีมงานได้เตรียมขึ้น จะครอบคลุมการมอดูเลตหลายวิธี ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้

แถบความถี่ที่ใช้	วิธีการมอดูเลต
แถบความถี่ฐาน	PAM (pulse amplitude modulation) PWM (pulse width modulation) PPM (pulse position modulation)
แถบความถี่ผ่าน	ASK (amplitude shift keying) FSK (frequency shift keying) PSK (phase shift keying) QPSK (quadrature phase shift keying)

นอกเหนือจากการมอดูเลตหลายวิธี กิจกรรมการทดลองจะรวมถึงการสาธิตการร่วมใช้ช่องสัญญาณ (multiple access) ซึ่งเป็นการส่งบิตข้อมูลจากผู้ใช้งาน 2 คน โดยการร่วมใช้ช่องสัญญาณมีวิธีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA (time division multiple access)
- การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ FDMA (frequency division multiple access)
- การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA (code division multiple access)

สัญญาณรายคาบไม่จำเป็นต้องเป็นรูปไซน์เสมอไป รูปข้างล่างแสดงสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยม และสัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยม ที่มีคาบเท่ากับ T



การเขียนสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์จะยุ่งยากกว่าการเขียนสัญญาณรูปไซน์ เนื่องจากไม่มีฟังก์ชันที่คุ้นเคยเพียงฟังก์ชันเดียวที่สามารถบ่งบอกรูปสัญญาณได้ ดังนั้นจึงมักจะเห็นการเขียนสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยมในรูปของสัญญาณพื้นฐานอื่น ๆ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเราใช้ฟังก์ชันเครื่องหมาย

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

จะสามารถเขียนสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยมที่มีคาบ T และมีค่าสูงสุดและต่ำสุดเป็น A และ $-A$ ในรูปของสัญญาณรูปไซน์ได้เป็น

$$s(t) = A \text{sgn} \left(\sin \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \right)$$

อีกวิธีหนึ่งในการเขียนสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยมคือการนิยามสัญญาณพื้นฐาน

$$p_{\text{rect}}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T/2 \\ -1, & T/2 \leq t < T \end{cases}$$

และเขียนสัญญาณรายคาบเป็นผลบวกของสัญญาณพื้นฐานดังกล่าวกับตัวมันเองที่เวลาประจิม (delay time) ต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ ผลลัพธ์คือสมการสำหรับสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยมดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} s(t) &= \dots + A p_{\text{rect}}(t+T) + A p_{\text{rect}}(t) + A p_{\text{rect}}(t-T) + A p_{\text{rect}}(t-2T) + \dots \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} A p_{\text{rect}}(t-kT) \end{aligned}$$

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 1

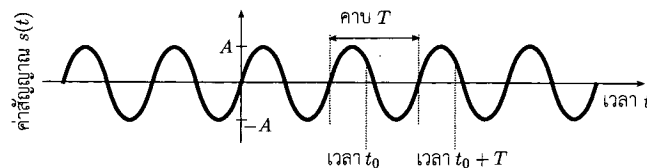
สัญญาณพื้นฐานและคุณสมบัติ

1.1 วัตถุประสงค์

1. สามารถบ่งบอกคาบและความถี่ของสัญญาณพื้นฐานที่ใช้ในการส่งข้อมูลดิจิทัล
2. สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงสัญญาณพื้นฐาน
3. สามารถวาดภาพของสัญญาณพื้นฐานจากสมการทางคณิตศาสตร์

1.2 ความรู้พื้นฐาน

สัญญาณรายคาบ (periodic signal) เป็นสัญญาณที่มีค่าซ้ำ ๆ กันในทุก ๆ คาบ (period) ของเวลา เช่นสัญญาณรูปไซน์ (sine) ดังแสดงในรูปข้างล่าง

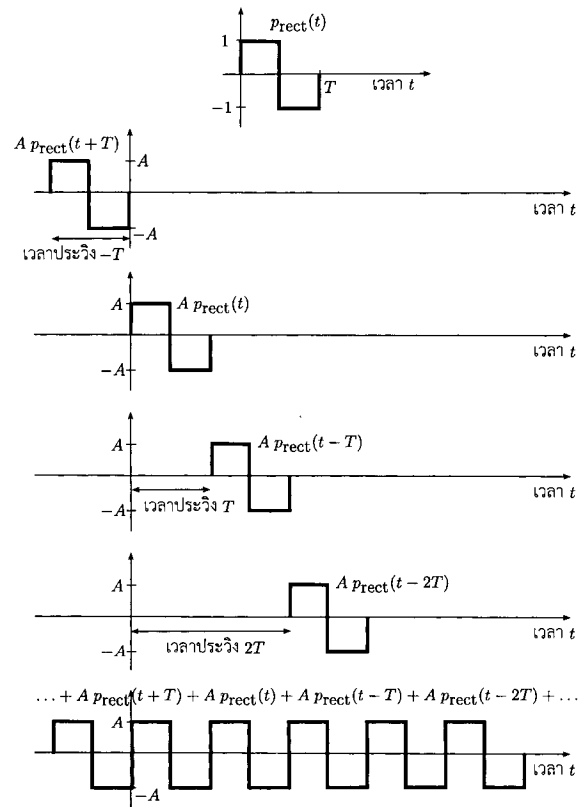


ในทางคณิตศาสตร์ สัญญาณ $s(t)$ จะเป็นสัญญาณรายคาบที่มีคาบเท่ากับ T ก็ต่อเมื่อ ณ เวลา t_0 ใด ๆ ค่าสัญญาณ $s(t_0)$ จะเท่ากับค่าสัญญาณ $s(t_0 + T)$

ความถี่ (frequency) ของสัญญาณรายคาบคือส่วนกลับ (inverse) ของคาบ ยกตัวอย่างเช่น สัญญาณรายคาบที่มีคาบ $T = 0.1$ s จะมีความถี่ $1/T = 10$ Hz

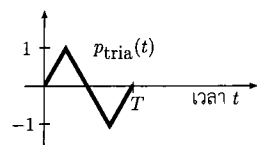
สัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ $f = 1/T$ และมีค่าสูงสุดและต่ำสุดเป็น A และ $-A$ เขียนแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

$$s(t) = A \sin(2\pi f t) = A \sin \left(\frac{2\pi t}{T} \right)$$



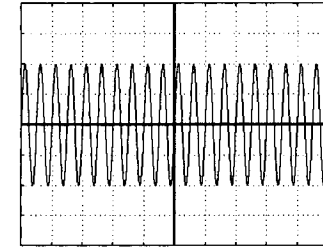
การเขียนสัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยม ทำได้ด้วยวิธีเดียวกันโดยอาศัยสัญญาณพื้นฐานดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ จากรูปสามารถเขียนสัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยมได้เป็น

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A p_{\text{tria}}(t - kT)$$



1.3 การเขียนสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงสัญญาณ

1. ตอบคำถามเกี่ยวกับสัญญาณรูปไซน์ข้างล่างนี้โดยเติมคำตอบในช่องว่าง



1 ms/Div (แนวนอน) และ 1 V/Div (แนวตั้ง)

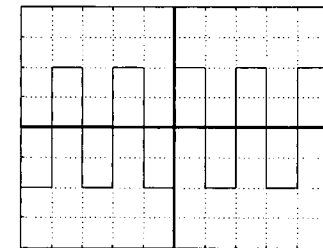
คาบของสัญญาณรูปไซน์ (หน่วยเป็น s) มีค่าเป็น

ความถี่ของสัญญาณรูปไซน์ (หน่วยเป็น Hz) มีค่าเป็น

กำหนดให้ t แทนค่าเวลา (หน่วยเป็น s) และให้ $s(t)$ แทนค่าของสัญญาณ (หน่วยเป็น V) สมการทางคณิตศาสตร์ของ $s(t)$ คือ

$$s(t) = \text{$$

2. ตอบคำถามเกี่ยวกับสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยมข้างล่างนี้โดยเติมคำตอบในช่องว่าง



1 ms/Div และ 1 V/Div

คาบของสัญญาณ (หน่วยเป็น s) มีค่าเป็น

ให้ $p_{\text{rect}}(t)$ แทนสัญญาณต่อไปนี้

$$p_{\text{rect}}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 0.001 \\ -1, & 0.001 \leq t < 0.002 \\ 0, & t < 0 \text{ หรือ } t \geq 0.002 \end{cases}$$

1.4. การวาดภาพของสัญญาณจากสมการทางคณิตศาสตร์

5

ถ้ากำหนดให้ $s(t)$ แทนสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยม สมการทางคณิตศาสตร์ของ $s(t)$ ในรูปของ $p_{\text{rect}}(t)$ คือ

$$s(t) =$$

3. จงเขียนสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ 4 kHz และมีค่าสูงสุดและต่ำสุดเป็น 500 mV และ -500 mV ตามลำดับ

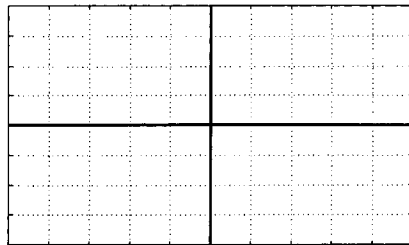
$$s(t) =$$

4. จงเขียนสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงสัญญาณราคาบาทรูปสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 4 kHz และมีค่าสูงสุดและต่ำสุดเป็น $+500$ mV และ -500 mV ในรูปของสัญญาณรูปไซน์โดยใช้ฟังก์ชันเครื่องหมาย (sgn)

 $s(t) =$

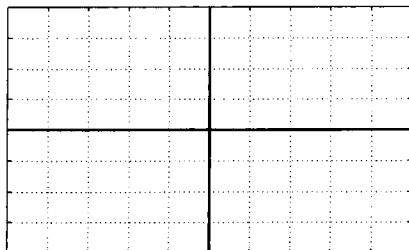
1.4 การวาดภาพของสัญญาณจากสมการทางคณิตศาสตร์

1. จงวาดภาพสัญญาณรูปไซน์ $s(t) = 2 \sin(1000\pi t)$



1 ms/Div (แกนนอน) และ 1 V/Div (แกนตั้ง)

2. จงวาดภาพสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่เป็น $1/2$ เท่าของสัญญาณในข้อที่แล้ว โดยมีค่าสัญญาณเท่าเดิม

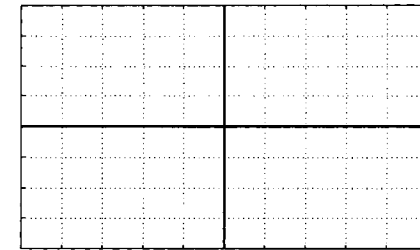


1 ms/Div และ 1 V/Div

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 1. สัญญาณพื้นฐานและคุณสมบัติ

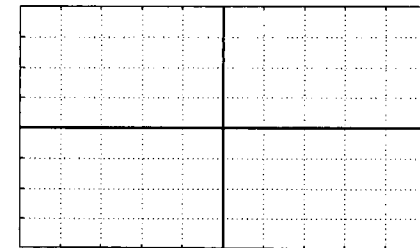
6

3. จงวาดภาพสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยม $s(t) = 3 \operatorname{sgn}(\sin(500\pi t))$



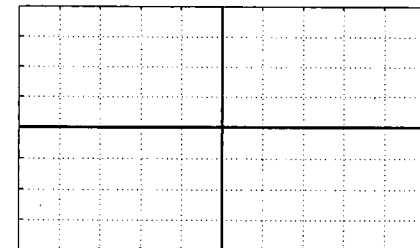
1 ms/Div และ 1 V/Div

4. จงวาดภาพสัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยมที่มีคาบ 2 ms และมีค่าสัญญาณสูงสุดและต่ำสุดเป็น 1.5 V และ -1.5 V ตามลำดับ



1 ms/Div และ 1 V/Div

5. จงวาดภาพสัญลักษณ์รายคาบรูปสามเหลี่ยมในข้อที่แล้วอีกครั้ง แต่เปลี่ยนหน่วยวัดแกนตั้งและแกนนอน
ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้



0.5 ms/Div และ 500 mV/Div

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 2

การใช้ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล

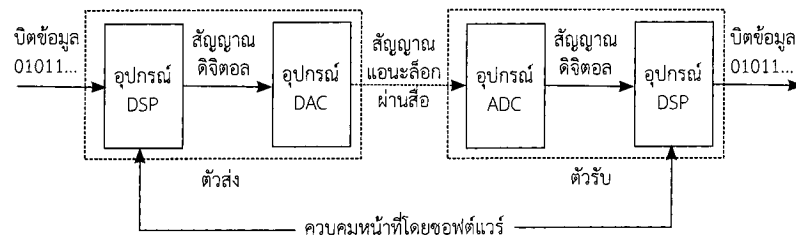
2.1 วัตถุประสงค์

1. สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัลได้อย่างถูกต้อง
2. สามารถใช้โปรแกรมกำหนดหน้าที่ของฮาร์ดแวร์ตามหมายเลขกิจกรรม
3. สามารถใช้ชุดทดลองส่งสัญญาณรายคาบแบบต่าง ๆ และปรับเปลี่ยนคาบของสัญญาณ

2.2 ความรู้พื้นฐาน

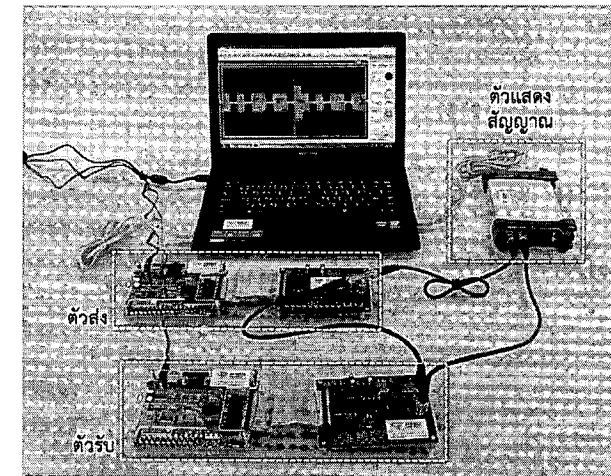
ชุดทดลองส่งข้อมูลแบบดิจิทัล ถูกพัฒนาขึ้นโดยทีมงานวิจัยและพัฒนาของศูนย์วิจัย BU-CROCCS (Bangkok University-Center of Research in Optoelectronics, Communications, and Control Systems) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ ตามแนวทาง software defined radio (หรือเรียกให้กว้างขึ้นได้เป็น software defined communications) ซึ่งก็คือการใช้ฮาร์ดแวร์ชุดเดียวทำการทดลองหลาย ๆ การทดลอง โดยหน้าที่ของชุดทดลองจะถูกควบคุมโดยซอฟต์แวร์ให้สอดคล้องกับเนื้อหาของแต่ละการทดลอง

รูปข้างล่างแสดงโครงสร้างของระบบส่งข้อมูลแบบดิจิทัลในแนวทาง software defined ข้อมูลต่าง ๆ ที่ถูกส่งจะอยู่ในรูปของบิตข้อมูล (ตัวเลข 0 และ 1)



- ตัวส่งจะทำการแปลงบิตข้อมูลให้อยู่ในรูปของสัญญาณซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการส่งผ่านสื่อ โดยการเตรียมสัญญาณนี้เริ่มจากการประมวลผลสัญญาณแบบ DSP (digital signal processing) และสิ้นสุดด้วยการแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อกด้วยอุปกรณ์ DAC (digital-to-analog converter)
- ในทางกลับกัน ตัวรับจะทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยอุปกรณ์ ADC (analog-to-digital converter) ตามด้วยการทำ DSP เพื่อตรวจจับบิตข้อมูลกลับคืนมา (detection) จากสัญญาณที่ได้รับได้

ในชุดทดลองที่ถูกพัฒนาขึ้น อุปกรณ์ประมวลสัญญาณแบบ DSP ที่ตัวส่งและที่ตัวรับ คืออุปกรณ์ FPGA (field programmable gate array) ของบริษัท Altera ซึ่งทีมงานสั่งซื้อจากบริษัท Terasic ที่นำ FPGA ของ Altera มาใช้สร้างแผงวงจรเพื่อการพัฒนา (development board) รุ่น DE0 ส่วนอุปกรณ์ DAC และอุปกรณ์ ADC นั้นทางทีมงานได้พัฒนาขึ้นเอง รูปข้างล่างแสดงชุดทดลองที่ถูกพัฒนาขึ้น ส่วนตารางข้างล่างแสดงรายชื่อและจำนวนอุปกรณ์ในชุดทดลอง

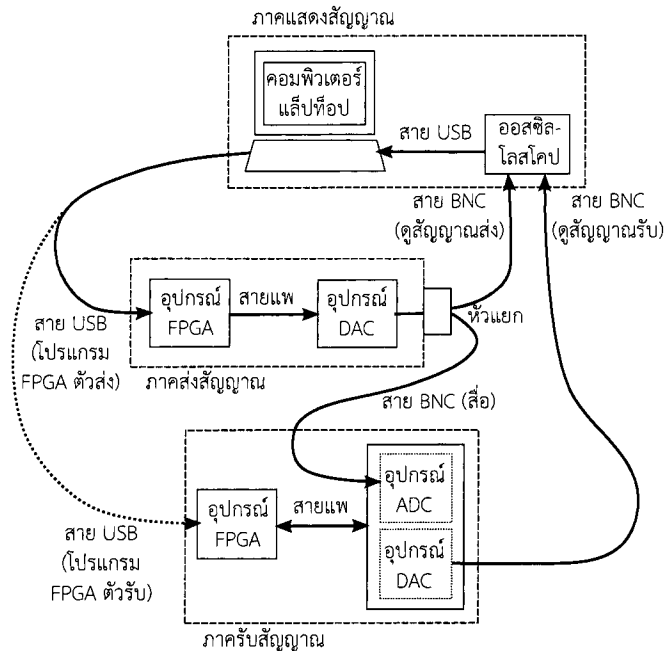


อุปกรณ์	จำนวน
คอมพิวเตอร์ Laptop (พร้อมสายไฟและหม้อแปลง)	1
Oscilloscope ชนิดต่อกับคอมพิวเตอร์	1
FPGA (พร้อมสายไฟ)	2
อุปกรณ์ DAC สำหรับตัวส่ง	1
อุปกรณ์ ADC+DAC สำหรับตัวรับ	1
สายแพ (ribbon cable)	2
สาย USB	2
สาย BNC	3
หัวแยกสาย BNC	1

2.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลอง

ให้ นศ. ตรวจสอบว่าอุปกรณ์ในชุดทดลองครบถ้วนโดยอิงจากตารางแสดงอุปกรณ์และจำนวนในหัวข้อที่แล้ว จากนั้นให้ นศ. เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองตามรูปข้างล่างนี้ โดยมีรายละเอียดเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

- การเชื่อมต่อสายแพกับอุปกรณ์ FPGA รุ่น DE0 ของ Terasic ให้ใช้หัวต่อ GPIO1 ซึ่งอยู่ทางขวามือของหัวต่อ GPIO0
- ให้ต่อสัญญาณจากตัวส่งเข้าสู่หัวต่อหมายเลข 1 (สีเหลือง) ของออสซิลโลสโคป (oscilloscope) และต่อสัญญาณจากตัวรับเข้าสู่หัวต่อหมายเลข 2 (สีฟ้า) ของออสซิลโลสโคป
- สาย USB สำหรับการโปรแกรมบ่งบอกหน้าที่อุปกรณ์ FPGA นั้น ให้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ FPGA ของตัวส่ง ก่อน ถึงเวลาที่ต้องการจะโปรแกรมอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับจึงค่อยย้ายสาย



2.4 การโปรแกรมหน้าที่อุปกรณ์ FPGA

ให้ นศ. โปรแกรมหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA โดยใช้ขั้นตอนต่อไปนี้ (หมายเหตุ: ในการทดลองที่ใช้อุปกรณ์ FPGA 2 ตัว สำหรับตัวส่งและตัวรับ ให้โปรแกรมหน้าที่ของ FPGA ที่ละตัว)

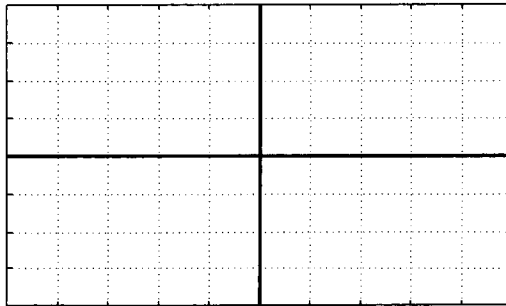
1. เปิดอุปกรณ์ FPGA และต่ออุปกรณ์ FPGA กับเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB
2. เปิดโปรแกรม Quartus II Programmer
3. ในหน้าต่างการใช้งานของ Quartus II Programmer กด "Add File..." เพื่อที่จะเลือกไฟล์สำหรับโปรแกรมหน้าที่ของ FPGA
4. เลือกไฟล์ที่เหมาะสมกับการทดลองที่สนใจ เช่น ใช้ไฟล์ 102_Tx.sof กำหนดหน้าที่ FPGA ของตัวส่งในกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 2 และใช้ไฟล์ 103_Rx.sof กำหนดหน้าที่ FPGA ของตัวรับในกิจกรรมการเรียนรู้ที่ 3
5. หลังจากเลือกไฟล์ ในหน้าต่างการใช้งาน กด "Start" เพื่อโปรแกรมอุปกรณ์ FPGA ถ้าโปรแกรมสำเร็จ จะเห็นข้อความ "100% (Successful)" บนพื้นสีเขียวที่มุมขวาบนของหน้าต่างการใช้งาน ในเวลาประมาณ 2-3 วินาที หลังจากโปรแกรมสำเร็จ สามารถถอดสาย USB ระหว่าง FPGA กับเครื่องคอมพิวเตอร์ได้เพื่อนำไปใช้โปรแกรม FPGA อีกตัวหนึ่ง (ถ้าจำเป็น)
6. หากไม่สามารถกดปุ่ม "Start" ได้ในขั้นตอนที่ 5 อาจเป็นเพราะว่าโปรแกรมไม่สามารถเชื่อมต่อกับ FPGA ได้สำเร็จ ซึ่งในกรณีนี้ จะมีข้อความ "No Hardware" อยู่ข้าง ๆ ปุ่ม "Hardware Setup..." ที่มุมซ้ายบนของหน้าต่างการใช้งาน ถ้าเห็นข้อความนี้ ให้กด "Hardware Setup..."
7. ในหน้าต่างย่อยของ "Hardware Setup" ภายใต้ตัวเลือกชื่อ "Hardware Settings" ให้เปลี่ยนค่าของ "Currently selected hardware:" จาก "No hardware" เป็น "USB Blaster [USB-0]" จากนั้นกด "Close" เพื่อกลับไปหน้าต่างการใช้งานหลัก และทำตามขั้นตอนที่ 5 จนสำเร็จ
8. หากไม่สามารถเปลี่ยนค่าของ "Currently selected hardware:" จาก "No hardware" เป็น "USB Blaster [USB-0]" ได้ในขั้นตอนที่ 6 อาจเป็นเพราะว่ายังไม่ได้ติดตั้งโปรแกรม driver สำหรับ USB Blaster ในกรณีนี้ให้ปฏิบัติตามขั้นตอนที่อยู่ใน website ต่อไปนี้

<http://www.altera.com/download/drivers/usb-blaster/dri-usb-blaster-vista.html>

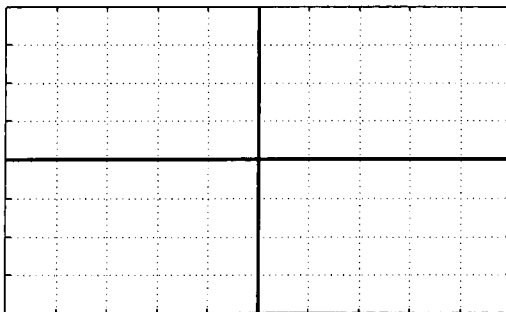
2.5 การส่งสัญญาณรูปไซน์

1. ใช้ไฟล์ lab2_Tx.sof โปรแกรมอุปกรณ์ FPGA ของตัวส่ง จากนั้นใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ 1 kHz และแสดงผลผ่านออสซิลโลสโคป โดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (voltage) ที่ต่ำสุดและสูงสุดของสัญญาณ อยู่ที่ -1 V และ 1 V ตามลำดับ วาดรูปสัญญาณที่สังเกตเห็นได้ในจอแสดงผล โดยตั้งค่าจอแสดงผลที่ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div

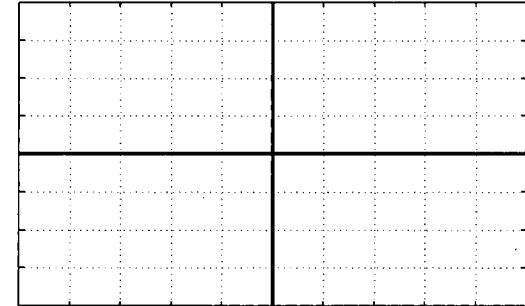
หมายเหตุ: การเปลี่ยนรูปร่างของสัญญาณจากตัวส่ง ทำได้โดยการกดสวิทช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวส่ง การเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณ ทำได้โดยการกดสวิทช์แบบปุ่มกด BUTTON1 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวส่ง สำหรับค่าสัญญาณต่ำสุดและสูงสุดนั้น ถูกกำหนดให้เท่ากับ -1 V และ 1 V โดยอัตโนมัติ



2. ทำข้อ 1 ซ้ำ โดยตั้งค่าจอแสดงผลที่ 1 ms/Div และ 1 V/Div (แทน 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div)



3. ทำข้อ 1 ซ้ำสำหรับความถี่ 2 kHz (แทน 1 kHz)



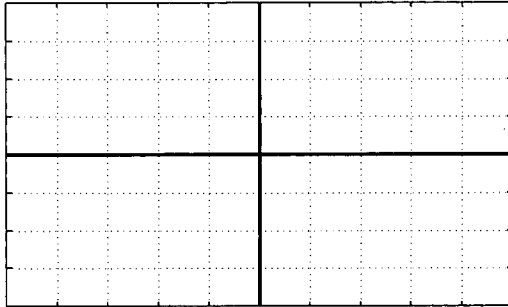
4. ตั้งค่าจอแสดงผลที่ 1 s/Div และ 0.5 V/Div จากนั้นดูสัญญาณผ่านออสซิลโลสโคปในเชิงความถี่โดยเลือกแสดงผลของการทำ FFT (fast Fourier transform) และเขียนตำแหน่งความถี่ที่มีค่า FFT สูงที่สุดในกรณีต่างๆ ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้

หมายเหตุ: ให้ข้ามขั้นตอนนี้อ้ออสซิลโลสโคปไม่สามารถคำนวณหา FFT ได้

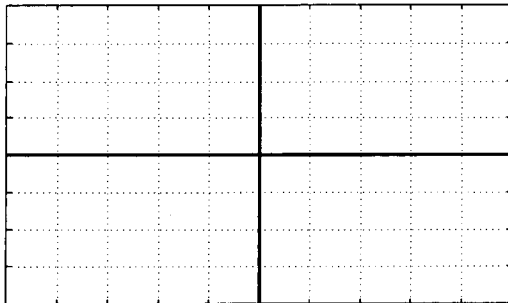
ความถี่ของสัญญาณรูปไซน์ (kHz)	ตำแหน่งความถี่ที่มีค่า FFT สูงสุด (kHz)
1	
2	
4	

2.6 การส่งสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยม

1. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยม ที่มีคาบ 1 ms และแสดงผลผ่านออสซิลโลสโคป โดยให้ค่าต่ำสุดและสูงสุดของสัญญาณ อยู่ที่ -1 V และ 1 V ตามลำดับ วาดรูปสัญญาณที่เห็นในจอแสดงผล โดยตั้งค่าจอแสดงผลที่ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div



2. ทำข้อ 1 ซ้ำสำหรับคาบ 0.5 ms (แทน 1 ms)



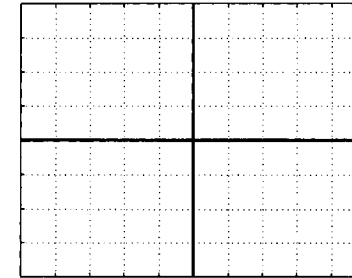
3. ตั้งค่าจอแสดงผลที่ 1 s/Div และ 0.5 V/Div จากนั้นดูสัญญาณผ่านออสซิลโลสโคปในเชิงความถี่โดยเลือกแสดงผลของการทำ FFT และเขียนตำแหน่งความถี่ที่มีค่า FFT สูงที่สุดในกรณีต่าง ๆ ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้

หมายเหตุ: ให้ข้ามขั้นตอนนี้ถ้าออสซิลโลสโคปไม่สามารถคำนวณหา FFT ได้

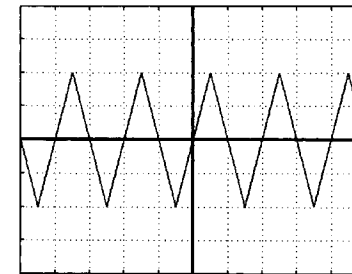
คาบของสัญญาณรายคาบรูปสี่เหลี่ยม (ms)	ตำแหน่งความถี่ที่มีค่า FFT สูงสุด (kHz)
1	
0.5	
0.25	

2.7 การส่งสัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยม

1. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยม ที่มีคาบ 0.5 ms และแสดงผลผ่านออสซิลโลสโคป โดยให้ค่าที่ต่ำสุดและสูงสุดของสัญญาณ อยู่ที่ -1 V และ 1 V ตามลำดับ วาดรูปสัญญาณที่เห็นได้ในจอแสดงผล โดยตั้งค่าจอแสดงผลที่ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div



2. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ เติมค่าของคาบที่ใช้ในช่องว่าง



0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div

คาบที่ใช้คือ

จากรูปอัตราขยายที่ความถี่ 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 kHz จะเท่ากับ 1 1 0.5 0 และ 0 ตามลำดับ ถ้าสัญญาณขาเข้าตัวกรองเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่ความถี่ต่าง ๆ จะได้สัญญาณขาออกดังต่อไปนี้

ความถี่ (kHz)	อัตราขยาย	สัญญาณขาเข้า	สัญญาณขาออก
0.5	1	$\sin(1000\pi t)$	$1 \times \sin(1000\pi t)$ $= \sin(1000\pi t)$
1	1	$\sin(2000\pi t)$	$1 \times \sin(2000\pi t)$ $= \sin(2000\pi t)$
1.5	0.5	$\sin(3000\pi t)$	$0.5 \times \sin(3000\pi t)$ $= 0.5 \sin(3000\pi t)$
2	0	$\sin(4000\pi t)$	$0 \times \sin(4000\pi t)$ $= 0$
2.5	0	$\sin(5000\pi t)$	$0 \times \sin(5000\pi t)$ $= 0$

ในกรณีที่สัญญาณขาเข้ามีองค์ประกอบหลายความถี่ สามารถใช้หลักการซ้อนทับ (superposition) ในการคำนวณหาสัญญาณขาออกได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าสัญญาณขาเข้าเป็น

$$\sin(1000\pi t) + 2 \sin(2000\pi t) + 3 \sin(3000\pi t)$$

จะได้สัญญาณขาออกเป็น

$$1 \times \sin(1000\pi t) + 1 \times 2 \sin(2000\pi t) + 0.5 \times 3 \sin(3000\pi t) \\ = \sin(1000\pi t) + 2 \sin(2000\pi t) + 1.5 \sin(3000\pi t)$$

ซึ่งก็คือผลบวกของสัญญาณขาออกสำหรับสัญญาณขาเข้าแต่ละตัว

ในหลายกรณี ค่าอัตราขยายของตัวกรองจะเป็นจำนวนเชิงซ้อน (complex number) ในกรณีเหล่านี้จะแสดงค่าอัตราขยายสัญญาณด้วยกราฟ 2 เส้น เส้นหนึ่งสำหรับผลตอบสนองแอมพลิจูด (amplitude response) และอีกเส้นหนึ่งสำหรับผลตอบสนองเฟส (phase response)

ถ้าให้ $H(f)$ แทนผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ f และเป็นจำนวนเชิงซ้อน จะได้ว่าผลตอบสนองแอมพลิจูดคือค่าแอมพลิจูดของ $H(f)$ (แทนด้วย $|H(f)|$) ส่วนผลตอบสนองเฟสคือค่าเฟสของ $H(f)$ (แทนด้วย $\angle H(f)$)

หมายเหตุ: สำหรับจำนวนเชิงซ้อน $z = a + bi$ ใด ๆ ค่าแอมพลิจูดและเฟสของ z คำนวณได้จาก

$$|z| = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \angle z = \arctan(b/a)$$

ยกตัวอย่างเช่น $z = 3 + 4i$ จะมี $|z| = 5$ และ $\angle z = 0.9273 \text{ rad}$

สำหรับตัวกรองที่มีผลตอบสนองเชิงความถี่ที่เป็นจำนวนเชิงซ้อน ถ้าสัญญาณรูปไซน์ขาเข้าคือ $\sin(2\pi ft)$ จะได้ว่าสัญญาณขาออกคือ

$$|H(f)| \sin(2\pi ft + \angle H(f))$$

จะเห็นว่าตัวกรองจะมีผลต่อทั้งค่าสูงสุดและต่ำสุด และค่าเฟสของสัญญาณ

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 3

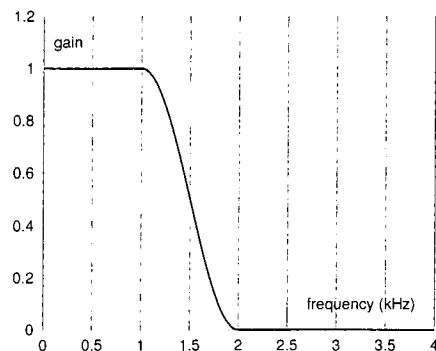
การกรองสัญญาณเบื้องต้น

3.1 วัตถุประสงค์

1. สามารถบ่งบอกอัตราขยาย (gain) ของตัวกรองสัญญาณ (filter) ที่ความถี่ต่าง ๆ จากกราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response)
2. สามารถบ่งบอกสัญญาณขาออกของตัวกรองสัญญาณจากกราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ โดยสัญญาณขาเข้ามีรูปไซน์ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน
3. สามารถใช้ชุดทดลองส่งสัญญาณผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (lowpass filter) และดูสัญญาณขาออกสำหรับสัญญาณขาเข้าที่ความถี่ต่าง ๆ กัน

3.2 ความรู้พื้นฐาน

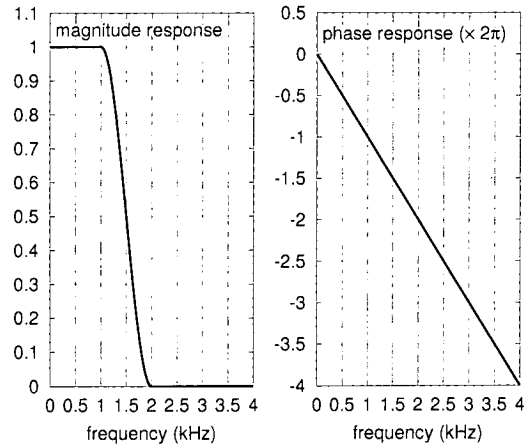
ตัวกรองสัญญาณ (filter) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับการประมวลผลสัญญาณ (signal processing) เราสามารถแสดงคุณสมบัติของตัวกรองสัญญาณได้ในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response) ซึ่งเป็นกราฟของอัตราขยาย (gain) ที่ความถี่ต่าง ๆ รูปข้างล่างแสดงตัวอย่างของผลตอบสนองเชิงความถี่สำหรับตัวกรองความถี่ต่ำ (lowpass filter) ที่กรองความถี่สูงกว่า 1.5 kHz ออกจากสัญญาณขาเข้า



3.2. ความรู้พื้นฐาน

17

ยกตัวอย่างเช่น ตัวกรองที่มีผลตอบสนองแอมพลิจูดและผลตอบสนองเฟสดังรูปข้างล่าง จะมีสัญญาณขาออกเมื่อเทียบกับสัญญาณรูปไซน์ขาเข้าดังแสดงในตาราง



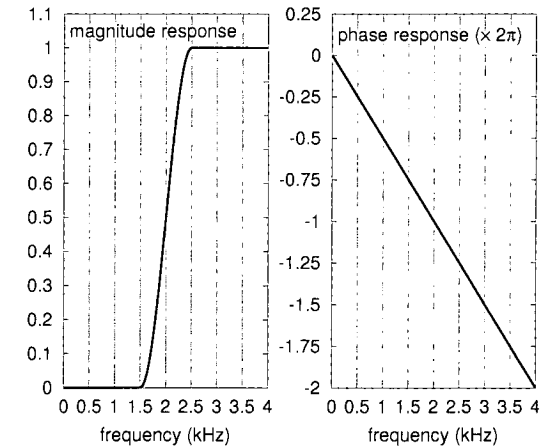
ความถี่ (kHz)	ผลตอบสนองแอมพลิจูด	ผลตอบสนองเฟส	สัญญาณขาเข้า	สัญญาณขาออก
0.5	1	$-\pi$	$\sin(1000\pi t)$	$1 \times \sin(1000\pi t - \pi) = -\sin(1000\pi t)$
1	1	-2π	$\sin(2000\pi t)$	$1 \times \sin(2000\pi t - 2\pi) = \sin(2000\pi t)$
1.5	0.5	-3π	$\sin(3000\pi t)$	$0.5 \times \sin(3000\pi t - 3\pi) = -0.5 \sin(3000\pi t)$
2	0	-4π	$\sin(4000\pi t)$	$0 \times \sin(4000\pi t - 4\pi) = 0$
2.5	0	-5π	$\sin(5000\pi t)$	$0 \times \sin(5000\pi t - 5\pi) = 0$

18

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 3. การกรองสัญญาณเบื้องต้น

3.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง

- พิจารณาถึงการกรองสัญญาณด้วยตัวกรองความถี่สูง (highpass filter) ที่มีผลตอบสนองแอมพลิจูดและผลตอบสนองเฟสดังรูปข้างล่างนี้ จากนั้น เติมคำตอบในช่องว่างของตาราง



ความถี่ (kHz)	ผลตอบสนองแอมพลิจูด	ผลตอบสนองเฟส	สัญญาณขาเข้า	สัญญาณขาออก
0.5	0	-0.5π	$\sin(1000\pi t)$	$0 \times \sin(1000\pi t - 0.5\pi) = 0$
1			$\sin(2000\pi t)$	
1.5			$\sin(3000\pi t)$	
2			$\sin(4000\pi t)$	
2.5			$\sin(5000\pi t)$	

- เขียนสูตรคณิตศาสตร์ของสัญญาณขาออกจากตัวกรองสัญญาณในข้อ 1 โดยกำหนดให้สัญญาณขาเข้าเป็น $\sin(3000\pi t) - 2\sin(4000\pi t) + 3\sin(5000\pi t)$ หมายถึง: ใช้หลักการซ้อนทับ

3.4 การกรองสัญญาณโดยใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ

1. เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่ง ด้วยไฟล์ 103_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ 103_Rx.sof

หมายเหตุ: การโปรแกรมอุปกรณ์ FPGA ให้ทำที่ตัวส่งก่อน จากนั้นถอดสาย USB จาก FPGA ตัวส่งและต่อเข้ากับ FPGA ตัวรับ จึงค่อยโปรแกรม FPGA ที่ตัวรับ

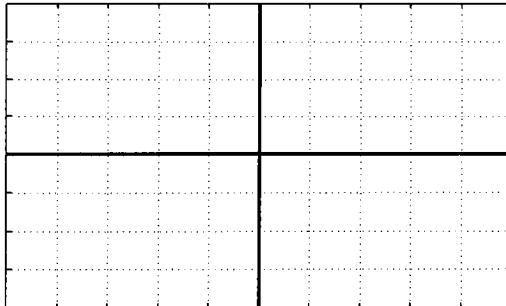
2. ใช้ตัวส่งสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ 1 kHz สัญญาณจากตัวส่งจะถูกแยกออกเป็น 2 สัญญาณ สัญญาณหนึ่งเข้าสู่ตัวรับ และอีกสัญญาณหนึ่งเข้าสู่ออสซิลโลสโคป

หมายเหตุ: การเลือกความถี่ของสัญญาณรูปไซน์จากตัวส่ง ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวส่ง

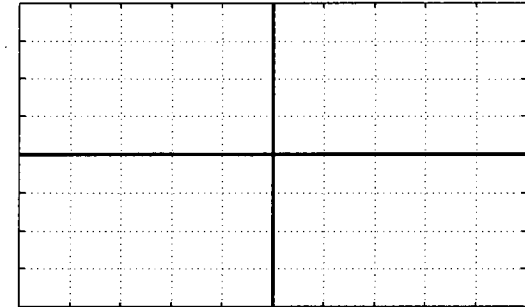
กำหนดให้ตัวรับใช้ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ ซึ่งจะกรองความถี่ที่สูงกว่า 2 kHz ออกไป

หมายเหตุ: การเลือกใช้ตัวกรองสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงไม่ใช้ตัวกรอง กดหนึ่งครั้งหมายถึงใช้ตัวกรอง และการกดครั้งต่อไปเป็นการสลับไปมาระหว่างการใช้และไม่ใช้ตัวกรอง

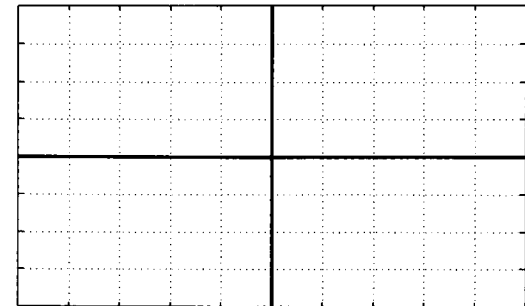
สัญญาณขาออกของตัวกรองที่ตัวรับจะเข้าสู่ออสซิลโลสโคป วาดรูปสัญญาณขาเข้า (จากตัวส่ง) และสัญญาณขาออก (จากตัวรับ) ของตัวกรองความถี่ต่ำ โดยตั้งค่าจอแสดงผลที่ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div



3. ทำข้อ 1 ข้างแต่ใช้ตัวส่งสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ 2 kHz (แทน 1 kHz)



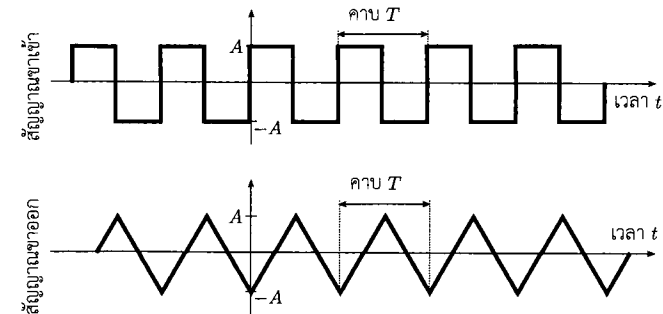
4. ทำข้อ 1 ข้างแต่ใช้ตัวส่งสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ 4 kHz (แทน 1 kHz)



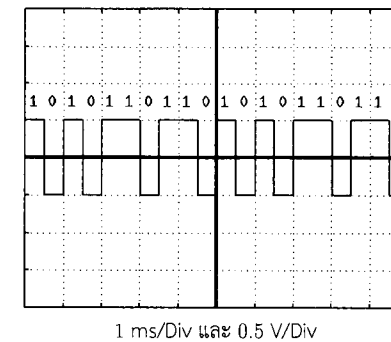
หมายเหตุ: สูตรคณิตศาสตร์ของสัญญาณขาออกที่เวลา t ได้แก่

$$\frac{1}{T} \int_{t-T}^T s(u) du$$

รูปข้างล่างแสดงอีกตัวอย่างของสัญญาณขาเข้าและขาออกของตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ โดยมีความกว้างของหน้าต่างค่าเฉลี่ยเท่ากับ T



พิจารณาถึงการส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จัก โดยใช้สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม (rectangular pulse) ที่มีค่าบวกแทนบิต 1 และใช้พัลส์ที่มีค่าลบแทนบิต 0 ดังแสดงในรูปข้างล่างสำหรับบิต 1010110110 จะเห็นได้ว่าการกำหนดค่าบวก (หรือค่าลบ) ของพัลส์แต่ละพัลส์ เปรียบเสมือนกับการแสดงข้อมูลจำนวน 1 บิต



หมายเหตุ: ในการส่งข้อมูลจริง บิตข้อมูลจะไม่ถูกส่งซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จัก สาเหตุของการส่งแบบไม่รู้จักในการทดลอง ก็เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตบิตข้อมูลในสัญญาณที่ถูกส่งจากตัวส่ง

ถ้าหากแต่ละพัลส์ มีความกว้างเท่ากับ T (หน่วยเป็น s) จะได้ว่าอัตราบิตของการส่งข้อมูล (transmission bit rate) มีค่าเท่ากับ $1/T$ (หน่วยเป็นบิตต่อวินาที หรือ bit/s หรือ bps) ดังนั้น อัตราบิตของการส่งข้อมูลในรูปเท่ากับ 2 kbps

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 4

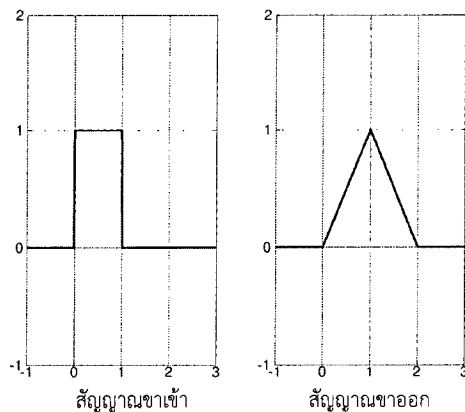
การใช้ตัวกรองจับคู่

4.1 วัตถุประสงค์

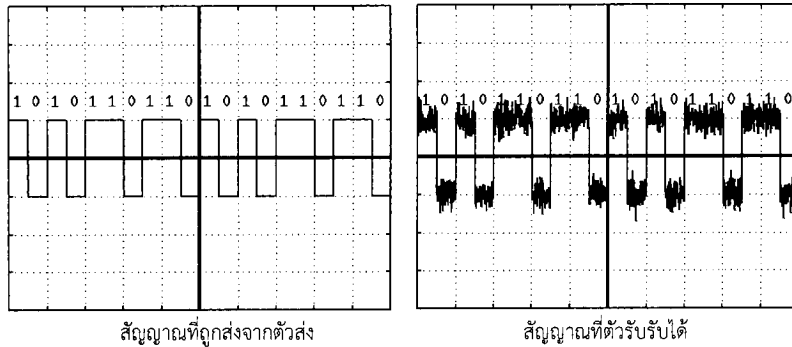
1. สามารถบ่งบอกสัญญาณขาออกของตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average filter) และตัวกรองจับคู่ (matched filter) จากสัญญาณขาเข้า
2. สามารถใช้ชุดทดลองสร้างสัญญาณที่ประกอบไปด้วยพัลส์สี่เหลี่ยม (rectangular pulse) จากบิตข้อมูล
3. สามารถใช้ชุดทดลองส่งสัญญาณข้อมูลจากตัวส่ง และประมวลผลสัญญาณที่ตัวรับด้วยตัวกรองจับคู่

4.2 ความรู้พื้นฐาน

ตัวกรองที่สำคัญชนิดหนึ่ง คือตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average filter) ที่มีหน้าต่าง (window) สำหรับหาค่าเฉลี่ยกว้าง T (หน่วยเป็น s) ในตัวกรองนี้ ค่าสัญญาณขาออกที่เวลา t จะเท่ากับค่าเฉลี่ยของสัญญาณขาเข้าในช่วงเวลา $(t - T, T]$ รูปข้างล่างแสดงตัวอย่างของสัญญาณขาเข้าและขาออกของตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่มีหน้าต่างค่าเฉลี่ยกว้าง 1 หน่วยเวลา

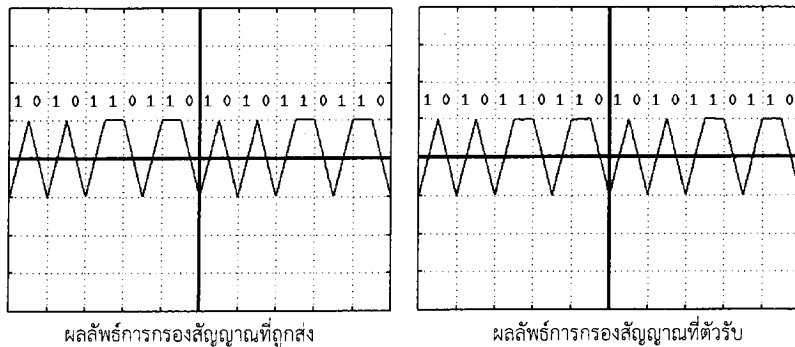


รูปข้างล่างแสดงความแตกต่างระหว่างสัญญาณข้อมูลที่ถูกส่งจากตัวส่ง และสัญญาณที่ตัวรับรับได้ซึ่งได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (noise) ทำให้ค่าสัญญาณผิดเพี้ยนไป



หากเราทำการซิกค่าสัญญาณ (sampling) ที่ตัวรับรับได้เพื่อหาว่าสัญญาณเป็นบวกหรือเป็นลบ (สำหรับบิต 1 และบิต 0 ตามลำดับ) จะมีโอกาสเกิด**บิตผิดพลาด (bit error)** ได้บ่อยครั้งที่ตัวรับในกรณีที่สัญญาณรบกวนมีค่ามากเมื่อเทียบกับสัญญาณข้อมูล

แทนที่ตัวรับจะซิกค่าสัญญาณจากสัญญาณที่รับได้โดยตรง ตัวรับสามารถใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่มีความกว้างหน้าต่างค่าเฉลี่ยเท่ากับความกว้างของพัลส์สี่เหลี่ยม ข้อดีของการกรองแบบหาค่าเฉลี่ยคือสัญญาณรบกวนส่วนมากจะถูกกำจัดออกเนื่องจากค่าของสัญญาณรบกวนมักจะเป็นบวกและเป็นลบสลับกันไปมาในปริมาณที่เท่า ๆ กัน รูปข้างล่างแสดงสัญญาณขาออกจากตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ โดยสมมุติว่าสัญญาณขาเข้าคือสัญญาณข้อมูลที่ถูกส่งโดยตัวส่ง และสัญญาณที่ตัวรับรับได้ จะเห็นได้ว่าสัญญาณทั้งสองไม่แตกต่างกันมากถึงแม้ว่าตัวรับจะมีสัญญาณรบกวนก็ตาม



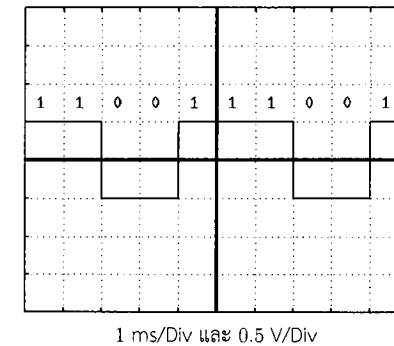
ดังนั้น การซิกค่าสัญญาณที่ตัวรับเพื่อตรวจรับบิตข้อมูล จึงมักจะทำจากสัญญาณขาออกจากตัวกรองที่ตัวรับ แทนที่จะทำจากสัญญาณที่ตัวรับรับได้โดยตรง

เราเรียกตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่มีความกว้างของหน้าต่างค่าเฉลี่ยเท่ากับความกว้างของพัลส์สี่เหลี่ยมว่า **ตัวกรองจับคู่ (matched filter)** เนื่องจากคุณสมบัติของตัวกรอง (ความกว้างของหน้าต่างค่าเฉลี่ย) สอดคล้องกับลักษณะของพัลส์ที่ใช้ส่งข้อมูล

หมายเหตุ: ในการส่งข้อมูลจริง พัลส์ที่เข้าอาจไม่ใช่รูปสี่เหลี่ยม ในกรณีเหล่านี้ คุณสมบัติของตัวกรองจับคู่ก็จะปรับเปลี่ยนไปตามลักษณะของพัลส์นั้น ๆ

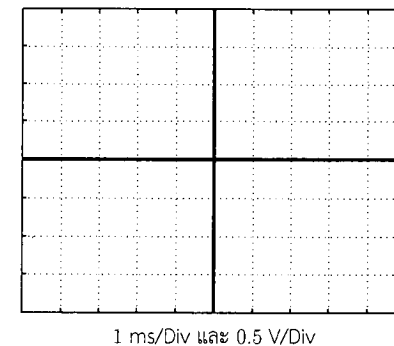
4.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง

- พิจารณาถึงการส่งบิตข้อมูลโดยใช้พัลส์สี่เหลี่ยม ดังแสดงด้วยสัญญาณในรูปข้างล่างนี้



จากรูป อัตราบิตของการส่งข้อมูล (หน่วยเป็น bps) คือ

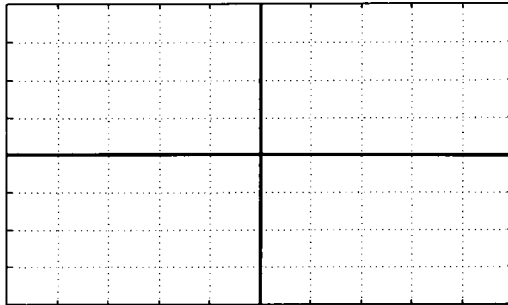
- สมมุติให้สัญญาณในข้อ 1 เป็นสัญญาณขาเข้าของตัวกรองจับคู่สำหรับพัลส์สี่เหลี่ยม จงวาดสัญญาณขาออกของตัวกรองจับคู่ลงบนรูปเดียวกันกับสัญญาณในข้อ 1
- จงวาดสัญญาณที่ถูกส่งสำหรับบิตข้อมูล 1010110110 แทนบิตข้อมูลในข้อ 1 โดยใช้อัตราบิตเท่าเดิม จากนั้นวาดสัญญาณขาออกของตัวกรองจับคู่ในรูปเดียวกัน โดยสมมุติให้สัญญาณข้อมูลเป็นสัญญาณขาเข้า



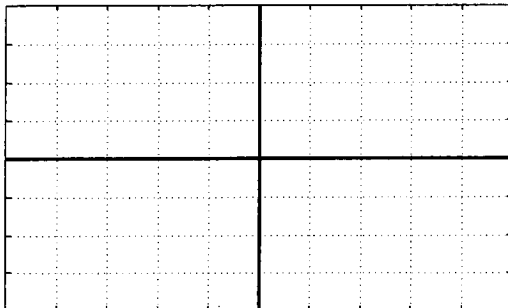
4.4 การกรองสัญญาณที่ตัวรับโดยใช้ตัวกรองจับคู่

1. เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่ง ด้วยไฟล์ 104_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ 104_Rx.sof
2. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณสำหรับส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จบที่อัตราบิต 1 kbps โดยใช้สวิตช์แบบเลื่อน 10 ตัว (SW9 ถึง SW0 บนอุปกรณ์ FPGA) ที่ตัวส่งกำหนดค่าบิต 10 บิตให้เท่ากับ 1010110110 ให้สังเกตว่าหลอดแอลอีดี 10 หลอดที่อยู่เหนือสวิตช์ 10 ตัวจะเปิดหรือปิดตามค่าบิต
3. จากนั้น กำหนดให้ตัวรับใช้ตัวกรองจับคู่ วาดรูปสัญญาณที่ถูกส่งจากตัวส่ง และสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ที่ตัวรับ โดยตั้งค่าจอแสดงผลที่ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้ค่าของบิตข้อมูลแรกอยู่ในช่องแรกของรูปที่วาด

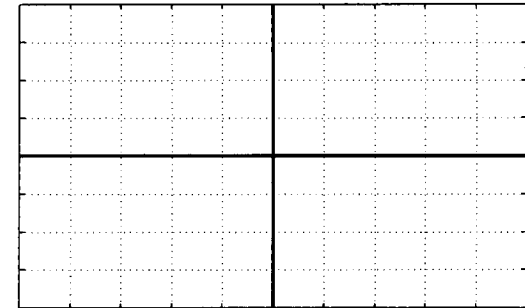
หมายเหตุ: การเลือกใช้ตัวกรองสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงไม่ใช้ตัวกรอง กดหนึ่งครั้งหมายถึงใช้ตัวกรองจับคู่ กดสองครั้งหมายถึงใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 3 ทางเลือก



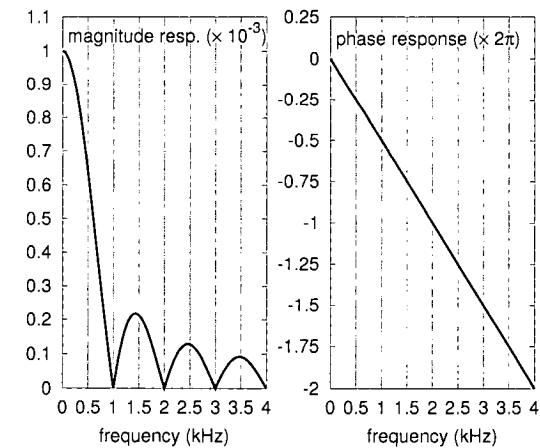
4. ทำข้อ 3 ซ้ำแต่ใช้บิต 0011001100 (แทนบิต 1010110110)



5. ทำข้อ 4 ซ้ำแต่ใช้ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (ซึ่งกรองความถี่สูงกว่า 2 kHz ออกไป) แทนตัวกรองจับคู่



หมายเหตุ: รูปในข้อ 4 และ 5 แสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงกันของผลลัพธ์จากตัวกรองจับคู่ และจากตัวกรองความถี่ต่ำ โดยตัวกรองจับคู่จัดว่าเป็นตัวกรองความถี่ต่ำประเภทหนึ่ง ซึ่งสามารถกรองความถี่สูง ๆ ในสัญญาณรบกวนออกไป รูปข้างล่างนี้แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองแอมพลิจูดและผลตอบสนองเฟส ของตัวกรองจับคู่สำหรับพัลส์สี่เหลี่ยมกว้าง 1 ms ซึ่งถูกนำมาใช้ในการทดลอง



จากผลตอบสนองแอมพลิจูด จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของตัวกรองจับคู่นั้น คล้ายคลึงกับคุณสมบัติของตัวกรองความถี่ต่ำ คือจะลดทอนองค์ประกอบของสัญญาณที่ความถี่สูง

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 5

การส่งบิตข้อมูลแบบ PAM

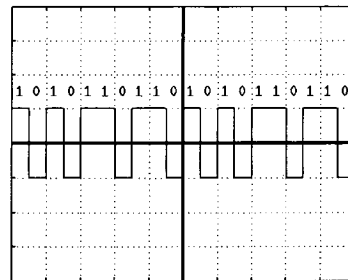
5.1 วัตถุประสงค์

1. สามารถบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ PAM
2. สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ PAM จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ และอัตราบิต
3. สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PAM
4. สามารถใช้ชุดทดลองแสดงผลกระทบของการตั้งเวลา (synchronization) ที่ตัวรับไม่ตรงกับเวลาที่ตัวส่ง

5.2 ความรู้พื้นฐาน

การส่งบิตข้อมูลแบบ PAM (pulse amplitude modulation) เป็นการแปลงบิตข้อมูลให้อยู่ในรูปของสัญญาณพัลส์ที่มีค่าแอมพลิจูด (ขนาดความกว้างวัดจากค่าเฉลี่ย) ต่าง ๆ กัน รูปข้างล่างแสดงตัวอย่างสัญญาณ PAM ที่ใช้พัลส์สี่เหลี่ยม แต่ละพัลส์มีค่าสัญญาณที่เป็นไปได้ 2 ค่าสำหรับส่งข้อมูล 1 บิต ได้แก่ 0.5 V (สำหรับบิต 1) และ -0.5 V (สำหรับบิต 0)

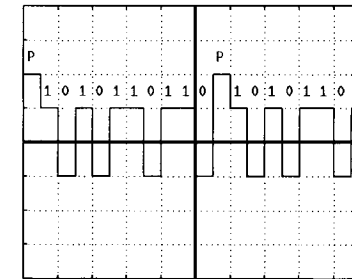
หมายเหตุ: สำหรับสัญญาณ PAM เราจะถือว่าค่าแอมพลิจูดจะเป็นบวก (สูงกว่าค่าเฉลี่ย) หรือเป็นลบ (ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย) ก็ได้



1 ms/Div และ 0.5 V/Div

จากรูป คาบของพัลส์ (pulse period) คือ 0.5 ms เนื่องจากข้อมูล 1 บิตถูกส่งในแต่ละพัลส์ อัตราบิตของการส่งข้อมูลจึงเท่ากับ 2 kbps

ในการส่งบิตข้อมูลเป็นกลุ่ม ๆ เช่นเป็นแพ็คเกจ (packet) ตัวรับจำเป็นต้องทราบจุดเริ่มต้นของข้อมูล ซึ่งอาจอยู่ในรูปของกลุ่มบิตที่มีค่าพิเศษ โดยจะไม่ซ้ำกับบิตข้อมูล เพื่อความง่ายต่อการสังเกต ชุดทดลองส่งข้อมูลนี้ใช้พัลส์ที่มีแอมพลิจูดเป็น 2 เท่าของพัลส์สำหรับบิต 1 เป็นสัญญาณบอกจุดเริ่มต้นของแต่ละกลุ่มบิต โดยจะเรียกพัลส์ที่อยู่ส่วนหัวของแต่ละกลุ่มบิตว่าสัญญาณนำ (preamble) รูปข้างล่างแสดงการส่งบิตข้อมูลโดยใช้สัญญาณนำเพื่อบอกจุดเริ่มต้นของแต่ละกลุ่มบิต

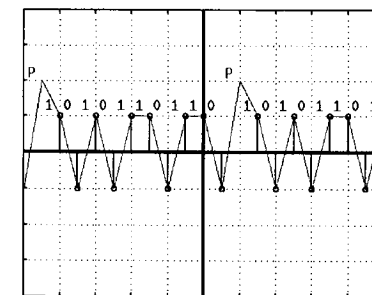


1 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

ในการส่งข้อมูลแบบมีสัญญาณนำ เนื่องจากข้อมูล 10 บิตถูกส่งด้วยสัญญาณพัลส์จำนวน 11 พัลส์ (รวมสัญญาณนำ) ในแต่ละกลุ่ม อัตราบิตของการส่งข้อมูลจึงเท่ากับ

$$\frac{10 \text{ bit}}{11 \times 0.5 \text{ ms}} = \frac{10 \text{ bit}}{5.5 \text{ ms}} \approx 1.82 \text{ kbps}$$

เมื่อตัวรับได้รับสัญญาณบิตข้อมูล ก็จะใช้ตัวกรองจับคู่ (matched filter) ประมวลผลสัญญาณก่อนทำการซิกค่าสัญญาณ (sampling) เส้นกราฟในรูปข้างล่างแสดงผลลัพธ์ของการใช้ตัวกรองจับคู่ที่ตัวรับ (ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนน้อยมาก) จะเห็นว่าตัวรับสามารถตรวจจับจุดเริ่มต้นของกลุ่มบิต (เวลาสิ้นสุดของสัญญาณนำ) โดยหาตำแหน่งที่สัญญาณขาออกจากรับจับคู่นั้นมีค่าสูงสุด



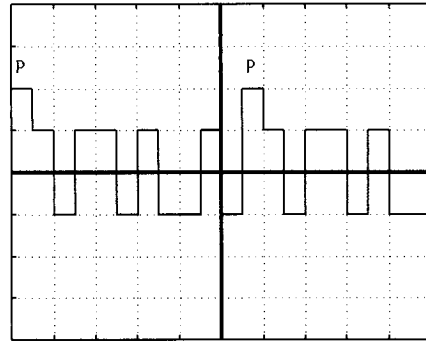
1 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

ค่าสัญญาณที่แทนด้วยจุดรูปวงกลมนั้นคือค่าซิกค่าสัญญาณ (sample) สำหรับแต่ละบิตข้อมูล โดยการซิกค่าสัญญาณจะทำการหาค่าเฉลี่ยของแต่ละคาบของพัลส์



5.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง

1. พิจารณาถึงการส่งข้อมูลแบบ PAM ดังแสดงด้วยสัญญาณในรูปข้างล่างนี้

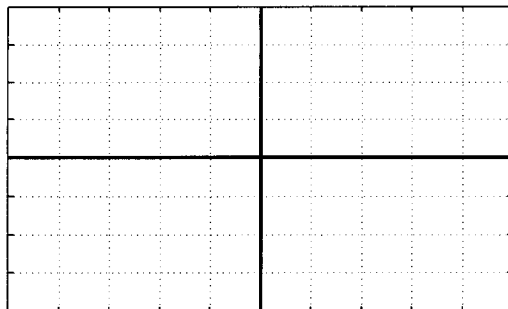


2 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

ในการส่งข้อมูลแบบมีสัญญาณนำสำหรับทุก ๆ กลุ่มของ 10 บิตข้อมูล อัตรา**บิตข้อมูล** (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งคือ

จากรูปบิตข้อมูล 10 บิตในแต่ละกลุ่มบิตคือ

2. สมมติให้สัญญาณในข้อ 1 เป็นสัญญาณที่ตัวรับรับได้ จงวาดสัญญาณขาออกของตัวกรองจังก์ที่ตัวรับลงบนภาพเดียวกับสัญญาณขาเข้าในข้อ 1
3. วาดรูปสัญญาณ PAM ที่ถูกส่งโดยมีสัญญาณนำ สำหรับบิต 1011010100 โดยใช้ค่าสัญญาณเหมือนกับในข้อ 1 ให้ 2 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้สัญญาณนำอยู่ข้างสุดของรูป



4. สมมติให้สัญญาณในข้อ 3 เป็นสัญญาณที่ตัวรับรับได้ จงวาดสัญญาณขาออกของตัวกรองจับคู่ที่ตัวรับลงบนภาพเดียวกับสัญญาณขาเข้าในข้อ 3 และวาดค่าซิกซ์สัญญาณสำหรับการตรวจรับผิด

5.4 การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PAM

1. เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่งด้วยไฟล์ 105_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ 105_Rx.sof
2. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณ PAM สำหรับส่งบิตข้อมูล 10 บิตเข้า ๆ กันแบบไม่รู้จบโดยใช้สวิตช์แบบเลื่อน 10 ตัว (SW9 ถึง SW0 บนอุปกรณ์ FPGA) กำหนดค่าบิต 10 บิตให้เท่ากับ 1010110110 จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับได้ โดยอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับจะแสดงค่าบิตผ่านแผงหลอดแอลอีดีจำนวน 10 หลอด

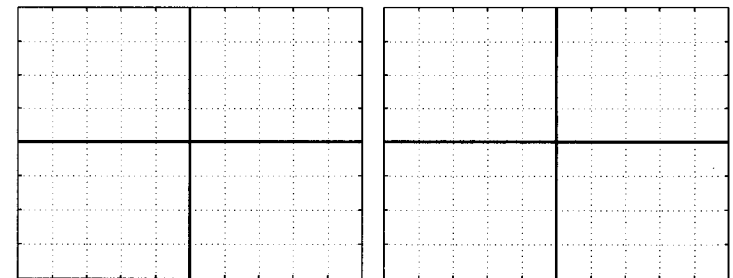
ค่าคาบของพัลส์ (หน่วยเป็น s) ของการส่งข้อมูลคือ

[illegible]

หมายเหตุ: นศ. ควรลองส่งคำบิตอื่น ๆ ดู และตรวจสอบว่าตัวรับรับบิตได้อย่างถูกต้อง

3. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วัดภาพสัญญาณส่งในภาพซ้าย และภาพสัญญาณรับในภาพขวา โดยตั้งค่าออสซิลโลสโคปที่ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div สำหรับสัญญาณทั้งสอง และให้ค่าของสัญญาณน้อยในช่วงแรกของรูปที่วาด

หมายเหตุ: การเลือกสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิชแบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงสัญญาณที่ตัวรับรับได้ กดหนึ่งครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ กดสองครั้งหมายถึงค่าสัญญาณ และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 3 ทางเลือก



ในบางกรณีค่าของสัญญาณ (amplitude) จากตัวส่งจะไม่เท่ากับค่าของสัญญาณจากตัวรับ เหตุผลที่ นศ. คิดว่าทำให้ค่าสัญญาณแตกต่างกันคือ (ตอบได้หลายคำตอบ)

4. ทำข้อ 3 ซ้ำสำหรับสัญญาณที่ตัวรับ โดยวาดสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่บนภาพเดียวกันกับสัญญาณที่ตัวรับได้ในข้อ 3

5.5 ความจำเป็นของการทำ synchronization อย่างถูกต้อง

1. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณ PAM สำหรับส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จบโดยใช้วิธีซิงแบบเลื่อน 10 ตัว (SW9 ถึง SW0 บนอุปกรณ์ FPGA) กำหนดค่าบิต 10 บิตให้เท่ากับ 1010110110 จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับได้ โดยอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับจะแสดงค่าบิตผ่านแผงหลอดแอลอีดีจำนวน 10 หลอด
2. เลือกดูค่าซิกซ์สัญญาณที่ตัวรับไปเพื่อรับบิตข้อมูล วาดภาพสัญญาณที่ถูกส่งและค่าซิกซ์สัญญาณที่ตัวรับ (ในภาพเดียวกัน) ที่สังเกตเห็นได้ในออสซิลโลสโคป โดยตั้งค่าที่ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div สำหรับสัญญาณทั้งสอง และให้ค่าของสัญญาณนาฬิกาอยู่ในช่องแรกของรูปที่วาด

หมายเหตุ: กรณีนี้เป็นกรณีการประสานเวลา (synchronization) นั้นถูกต้อง นั่นคือการตั้งเวลาเริ่มต้นของข้อมูลที่ได้รับนั้นถูกต้อง การชักค่าสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่จะเกิดขึ้นที่ส่วนท้ายคาบของแต่ละพัลส์ของบิตข้อมูล

[illegible]

3. ปรับค่าเวลาที่ตัวรับชกค่าสัญญาณให้ช้าลงเป็น 20% ของคาบของพัลส์

หมายเหตุ: การปรับให้การชั่งค่าสัญญาณข้างล่างทำได้โดยการกดสวิตช์แบบกด BUTTON1 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยข้าง $x\%$ จะแทนด้วย x ทางหน้าจอแสดงตัวเลขบน FPGA ของตัวรับ

[illegible]

วาดภาพสัญญาณที่ถูกส่งและค่าชักรับสัญญาณที่ตัวรับ (ในภาพเดียวกัน) ที่สังเกตเห็นได้ในออสซิลโลสโคป โดยตั้งค่าที่ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div สำหรับสัญญาณทั้งสอง

[illegible]

4. ปรับค่าเวลาที่ตัวรับชักราคาสัญญาณให้ข้างลงเป็น 30% 40% และ 50% ของคาบของพัลส์

30%: ค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับรู้ได้คือ □□□□□□□□□□

40%: ค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับรู้ได้คือ □□□□□□□□□□

50%: ค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับรู้ได้คือ □□□□□□□□□□

ล่างสำหรับบิต 1010110110 โดยที่สัญญาณนำเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีแอมพลิจูดเป็น 2 เท่าของพัลส์สำหรับ PWM และกว้างเท่ากับ 1/4 คาบของสัญลักษณ์

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 6

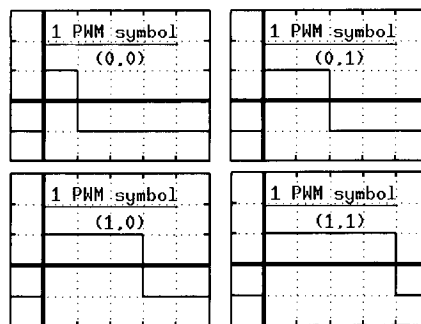
การส่งบิตข้อมูลแบบ PWM

6.1 วัตถุประสงค์

1. สามารถบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ PWM
2. สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ PWM จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ และอัตราบิต
3. สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PWM

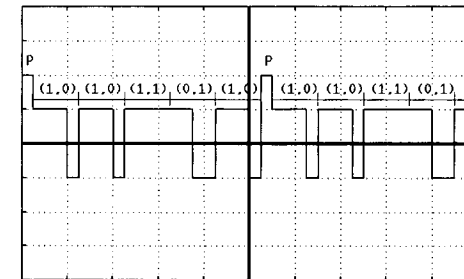
6.2 ความรู้พื้นฐาน

พิจารณาถึงการส่งบิตข้อมูลครั้งละ 2 บิต โดยใช้สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความกว้างต่าง ๆ กันแทนบิต ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ วิธีการส่งข้อมูลนี้เรียกว่าการส่งบิตข้อมูลแบบ PWM (pulse width modulation) แต่ละบิตจัดเป็นหนึ่งหน่วยข้อมูลเรียกว่าสัญลักษณ์ (symbol)



1 ms/Div และ 0.5 V/Div

เนื่องจากตัวรับจำเป็นต้องรู้เวลาเริ่มต้นของกลุ่มบิตข้อมูล ตัวส่งในชุดทดลองจึงเพิ่มสัญญาณนำ (preamble) ซึ่งเป็นสัญญาณที่อยู่ก่อนสัญญาณของบิตข้อมูลแต่ละชุด ๆ ละ 10 บิต (5 สัญลักษณ์) ดังแสดงในรูปข้าง

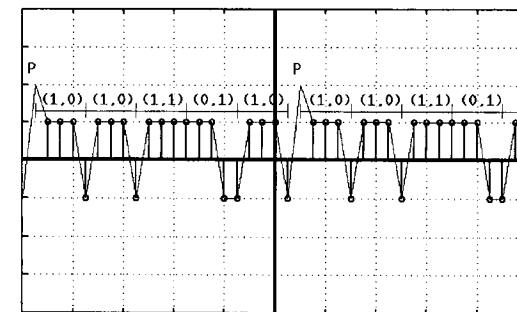


4 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

ในการส่งข้อมูลแบบมีสัญญาณนำ เนื่องจากข้อมูล 10 บิตถูกส่งในเวลา 21 ms (รวมสัญญาณนำ) ในแต่ละกลุ่ม อัตราบิตของการส่งข้อมูลจึงเท่ากับ

$$\frac{10 \text{ bit}}{21 \text{ ms}} \approx 0.476 \text{ kbps}$$

การตรวจจับบิตข้อมูลจากสัญญาณ PWM จะใช้ตัวกรองจับคู่ (matched filter) ที่เป็นตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่มีความกว้างหน้าต่างค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1/4 ของคาบของสัญลักษณ์ (ซึ่งเท่ากับ 1 ms ในรูป) จากนั้นตัวรับจะทำการซิกค่าสัญญาณ (sampling) จากสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่โดยซิก 4 ค่าสัญญาณสำหรับแต่ละสัญลักษณ์ของข้อมูล รูปข้างล่างแสดงตัวอย่างของการซิกค่าสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ สำหรับบิตข้อมูล 1010110110



4 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

หมายเหตุ: การแบ่งคาบของสัญลักษณ์ออกเป็น 4 ส่วนสอดคล้องกับการมีรูปสัญญาณ 4 แบบที่เป็นไปได้สำหรับแต่ละสัญลักษณ์ของ PWM ถ้าหากเรามีรูปสัญญาณ 8 แบบที่เป็นไปได้ ก็จะต้องแบ่งคาบของสัญลักษณ์ออกเป็น 8 ส่วน

แต่ละค่าซิกสัญญาณ (sample) จะแทนด้วย H หรือ L (ซึ่งย่อมาจาก High และ Low ตามลำดับ) โดยที่ H หมายถึงค่าซิกสัญญาณที่เป็นบวก และ L หมายถึงค่าซิกสัญญาณที่เป็นลบ จากค่าซิกสัญญาณแต่ละกลุ่ม ๆ ละ 4 ค่า ตัวรับจะสามารถรับบิตข้อมูลได้ดังต่อไปนี้

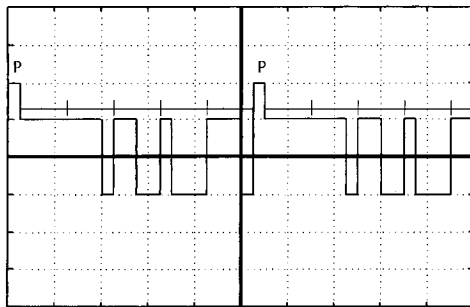
ค่าซิกสัญญาณ 4 ค่าของสัญลักษณ์	บิตข้อมูลของสัญลักษณ์
HLLL	(0, 0)
HHLL	(0, 1)
HHHL	(1, 0)
HHHH	(1, 1)
อื่น ๆ	บิตผิดพลาด

จากรูปค่าซิกสัญญาณที่ได้สำหรับแต่ละกลุ่มข้อมูลจะเป็น

$\overbrace{\text{HHHL}}_{(1,0)}$
 $\overbrace{\text{HHHL}}_{(1,0)}$
 $\overbrace{\text{HHHH}}_{(1,1)}$
 $\overbrace{\text{HHLL}}_{(0,1)}$
 $\overbrace{\text{HHHL}}_{(1,0)}$

6.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง

- พิจารณาถึงการส่งข้อมูลแบบ PWM ดังแสดงด้วยสัญญาณในรูปข้างล่างนี้

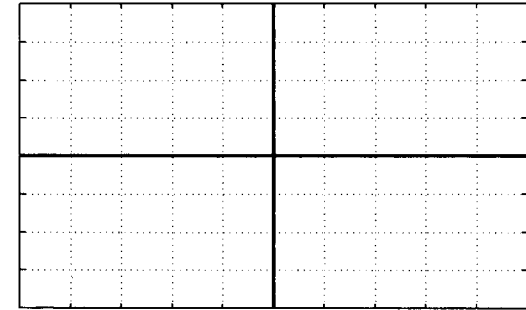


2 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

ในการส่งข้อมูลแบบมีสัญญาณนำสำหรับทุก ๆ กลุ่มของ 10 บิตข้อมูล อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งคือ

จากรูปบิตข้อมูล 10 บิตในแต่ละกลุ่มบิตคือ

- วาดรูปสัญญาณ PWM ที่ถูกส่งโดยมีสัญญาณนำ สำหรับบิต 1011010100 โดยใช้ค่าสัญญาณเหมือน กับในข้อ 1 ใช้ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้สัญญาณนำอยู่ซ้ายสุดของรูป



- สมมติให้สัญญาณในข้อ 2 เป็นสัญญาณที่ตัวรับรับได้ จงวาดสัญญาณขาออกของตัวกรองจับคู่ที่ตัวรับลงบนภาพเดียวกับสัญญาณขาเข้าในข้อ 2
- เขียนค่าซิกสัญญาณที่ได้จากสัญญาณขาออกของตัวกรองจับคู่ที่ตัวรับ จำนวน 20 ค่าสำหรับแต่ละกลุ่มบิต โดยแทนค่าซิกสัญญาณแต่ละค่าด้วย H หรือ L

- ตารางข้างล่างนี้แสดงค่าซิกสัญญาณที่ตัวรับของการส่งสัญญาณแบบ PWM จงเติมค่าบิตข้อมูลสำหรับ 2 สัญลักษณ์ (4 บิต)

ค่าซิกสัญญาณ 8 ค่าของ 2 สัญลักษณ์ PWM ที่ต่อกัน	บิตข้อมูลของ 2 สัญลักษณ์ PWM ที่ต่อกัน (4 บิต)
HLLLHHLL	
HHHLHHHH	
HHLLHLLL	
HHHLHHLL	

6.4 การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PWM

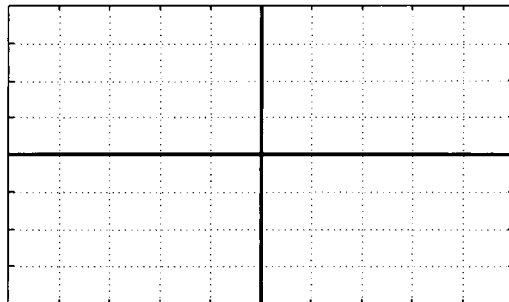
1. เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่งด้วยไฟล์ 106_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ 106_Rx.sof
2. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณ PWM สำหรับส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จักโดยใช้สวิตช์แบบเลื่อน 10 ตัว (SW9 ถึง SW0 บนอุปกรณ์ FPGA) กำหนดค่าบิต 10 บิตให้เท่ากับ 1010110110 จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับได้ โดยอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับจะแสดงค่าบิตผ่านแผงหลอดแอลอีดีจำนวน 10 หลอด

กำหนดให้หนึ่งสัญลักษณ์ประกอบไปด้วยข้อมูล 2 บิต ค่าคาบของสัญลักษณ์ (หน่วยเป็น s) ของการส่งข้อมูลคือ

ค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับได้คือ

หมายเหตุ: นศ. ควรตรวจสอบค่าบิตอื่น ๆ ดู และตรวจสอบว่าตัวรับรับบิตได้อย่างถูกต้อง

3. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วาดภาพสัญญาณที่ตัวรับรับได้ โดยตั้งค่าออสซิลโลสโคปที่ 2 ms/Div และ 0.5 V/Div ให้คาบของสัญญาณนำอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด



4. วาดสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของตัวรับบนภาพเดียวกันกับสัญญาณที่ตัวรับรับได้ในข้อ 3

หมายเหตุ: การเลือกดูสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงสัญญาณที่ตัวรับรับได้ กดหนึ่งครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 2 ทางเลือก

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 7

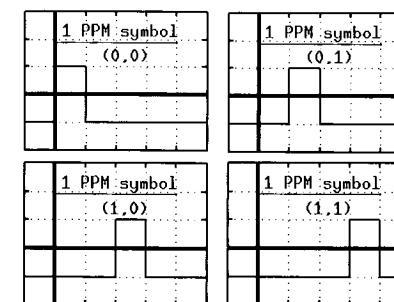
การส่งบิตข้อมูลแบบ PPM

7.1 วัตถุประสงค์

1. สามารถบ่งบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ PPM
2. สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ PPM จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ และอัตราบิต
3. สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PPM

7.2 ความรู้พื้นฐาน

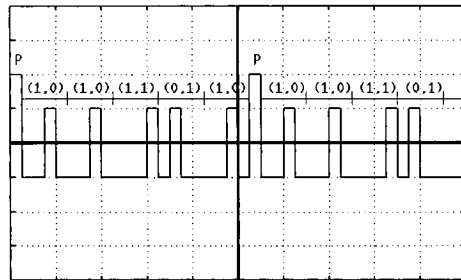
พิจารณาถึงการส่งบิตข้อมูลครั้งละ 2 บิต โดยใช้สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีตำแหน่งต่าง ๆ กันแทนคู่บิต ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ วิธีการส่งข้อมูลนี้เรียกว่าการส่งบิตข้อมูลแบบ PPM (*pulse position modulation*) แต่ละคู่บิตจัดเป็นหนึ่งหน่วยข้อมูลเรียกว่าสัญลักษณ์ (symbol)



1 ms/Div และ 0.5 V/Div

เนื่องจากตัวรับจำเป็นต้องรู้เวลาเริ่มต้นของกลุ่มบิตข้อมูล ตัวส่งในชุดทดลองจึงเพิ่มสัญญาณนำ (preamble) ซึ่งเป็นสัญญาณที่อยู่ก่อนสัญญาณของบิตข้อมูลแต่ละชุด ๆ ละ 10 บิต (5 สัญลักษณ์) ดังแสดงในรูปข้าง

ค่าสำหรับบิต 1010110110 โดยที่สัญญาณนำเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีแอมพลิจูดเป็น 2 เท่าของพัลส์สำหรับ PPM และกว้างเท่ากับ $1/4$ คาบของสัญญาณ

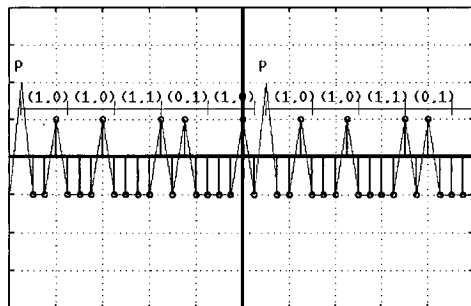


4 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

ในการส่งข้อมูลแบบมีสัญญาณนำ เนื่องจากข้อมูล 10 บิตถูกส่งในเวลา 21 ms (รวมสัญญาณนำ) ในแต่ละกลุ่ม อัตราบิตของการส่งข้อมูลจึงเท่ากับ

$$\frac{10 \text{ bit}}{21 \text{ ms}} = \frac{10 \text{ bit}}{21 \text{ ms}} \approx 0.476 \text{ kbps}$$

การตรวจจับบิตข้อมูลจากสัญญาณ PPM จะใช้ตัวกรองจับคู่ (matched filter) ที่เป็นตัวกรองคาบเลี้ยวเคลื่อนที่ที่มีความกว้างหน้าต่างค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1/4$ ของคาบของสัญญาณ (ซึ่งเท่ากับ 1 ms ในรูป) จากนั้นตัวรับจะทำการซิกค่าสัญญาณ (sampling) จากสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่โดยซิก 4 ค่าสัญญาณสำหรับแต่ละสัญญาณของข้อมูล รูปข้างล่างแสดงตัวอย่างของการซิกค่าสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ สำหรับบิตข้อมูล 1010110110



4 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

หมายเหตุ: การแบ่งคาบของสัญลักษณ์ออกเป็น 4 ส่วนสอดคล้องกับการมีรูปสัญญาณ 4 แบบที่เป็นไปได้สำหรับแต่ละสัญลักษณ์ของ PPM ถ้าหากเรามีรูปสัญญาณ 8 แบบที่เป็นไปได้ ก็จะแบ่งคาบของสัญลักษณ์ออกเป็น 8 ส่วน

แต่ละค่าซิกสัญญาณ (sample) จะแทนด้วย H หรือ L (ซึ่งย่อมาจาก High และ Low ตามลำดับ) โดยที่ H หมายถึงค่าซิกสัญญาณที่เป็นบวก และ L หมายถึงค่าซิกสัญญาณที่เป็นลบ จากค่าซิกสัญญาณแต่ละกลุ่ม ๆ ละ 4 ค่า ตัวรับจะสามารถรับบิตข้อมูลได้ดังต่อไปนี้

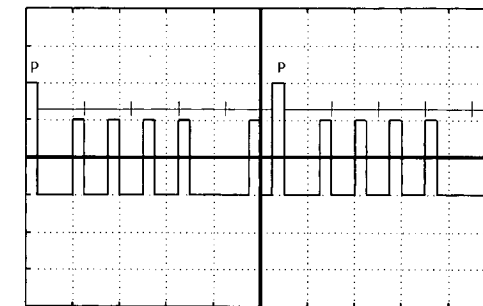
ค่าซีกสัญญาณ 4 คาบของสัญญาณ	บิตข้อมูลของสัญญาณ
HLLL	(0, 0)
LHLL	(0, 1)
LLHL	(1, 0)
LL LH	(1, 1)
อื่น ๆ	บิตผิดพลาด

จากรูปค่าซีกสัญญาณที่ได้สำหรับแต่ละกลุ่มข้อมูลจะเป็น

$$\underbrace{\text{LLHL}}_{(1,0)} \quad \underbrace{\text{LLHL}}_{(1,0)} \quad \underbrace{\text{LLLH}}_{(1,1)} \quad \underbrace{\text{LHLL}}_{(0,1)} \quad \underbrace{\text{LLHL}}_{(1,0)}$$

7.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง

1. พิจารณาถึงการส่งข้อมูลแบบ PPM ดังแสดงด้วยสัญญาณในรูปข้างล่างนี้

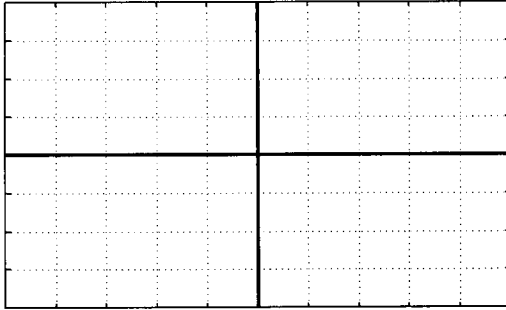


2 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

ในการส่งข้อมูลแบบมีสัญญาณนำสำหรับทุก ๆ กลุ่มของ 10 บิตข้อมูล อัตรา**บิตข้อมูล** (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งคือ

[illegible]

2. วาดรูปสัญญาณ PPM ที่ถูกส่งโดยมีสัญญาณนาฬิกา สำหรับบิต 1011010100 โดยใช้ค่าสัญญาณเหมือนกับในข้อ 1 ใช้ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้สัญญาณนาฬิกาอยู่ซ้ายสุดของรูป



3. สมมติให้สัญญาณในข้อ 2 เป็นสัญญาณที่ตัวรับรับได้ จงวาดสัญญาณขาออกของตัวกรองจับคู่ที่ตัวรับลงบนภาพเดียวกับสัญญาณขาเข้าในข้อ 2
4. เขียนค่าซิกสัญญาณที่ได้จากสัญญาณขาออกของตัวกรองจับคู่ที่ตัวรับ จำนวน 20 ค่าสำหรับแต่ละกลุ่มบิต โดยแทนค่าซิกสัญญาณแต่ละค่าด้วย H หรือ L

□ □

5. ตารางข้างล่างนี้แสดงค่าซิกสัญญาณที่ตัวรับของการส่งสัญญาณแบบ PPM จงเติมค่าบิตข้อมูลสำหรับ 2 สัญลักษณ์ (4 บิต)

ค่าซิกสัญญาณ 8 ค่าของ 2 สัญลักษณ์ PPM ที่ต่อกัน	บิตข้อมูลของ 2 สัญลักษณ์ PPM ที่ต่อกัน (4 บิต)
HLLLLLL	
LHLLLLLH	
LLHLHLLL	
LLLHLLL	

7.4 การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ PPM

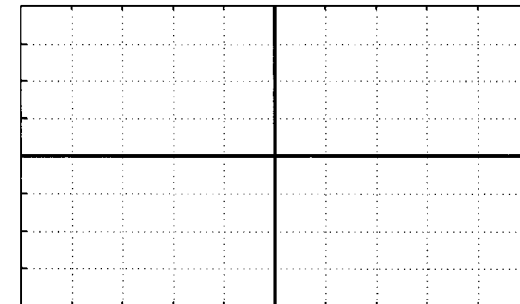
1. เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่งด้วยไฟล์ 107_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ 107_Rx.sof
2. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณ PPM สำหรับส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จบโดยใช้สวิตช์แบบเลื่อน 10 ตัว (SW9 ถึง SW0 บนอุปกรณ์ FPGA) กำหนดค่าบิต 10 บิตให้เท่ากับ 1010110110 จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับได้ โดยอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับจะแสดงค่าบิตผ่านแผงหลอดแอลอีดีจำนวน 10 หลอด

กำหนดให้หนึ่งสัญลักษณ์ประกอบไปด้วยข้อมูล 2 บิต ค่าคาบของสัญลักษณ์ (หน่วยเป็น s) ของการส่งข้อมูลคือ

ค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับได้คือ

หมายเหตุ: นศ. ควรลองส่งค่าบิตอื่น ๆ ดู และตรวจสอบว่าตัวรับรับบิตได้อย่างถูกต้อง

3. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วาดภาพสัญญาณที่ตัวรับรับได้ โดยตั้งค่าออสซิลโลสโคปที่ 2 ms/Div และ 0.5 V/Div ให้คาบของสัญญาณนาฬิกาอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด



4. วาดสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของตัวรับบนภาพเดียวกับสัญญาณที่ตัวรับรับได้ในข้อ 3

หมายเหตุ: การเลือกดูสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงสัญญาณที่ตัวรับรับได้ กดหนึ่งครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 2 ทางเลือก

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 8

การส่งบิตข้อมูลแบบ ASK

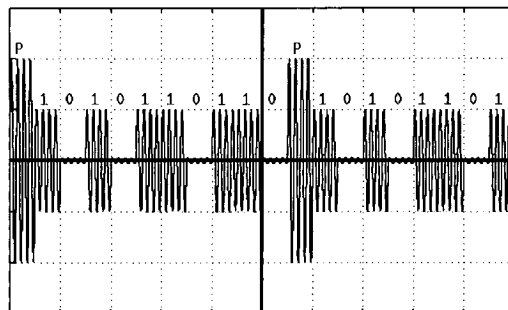
8.1 วัตถุประสงค์

1. สามารถบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ ASK
2. สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ ASK จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ อัตราบิต และความถี่ของคลื่นพาห์ (carrier frequency)
3. สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ ASK

8.2 ความรู้พื้นฐาน

การส่งข้อมูลแบบ PAM PWM และ PPM ในการทดลองก่อน ๆ จัดเป็นการส่งข้อมูลที่แถบความถี่ฐาน (base-band) เนื่องจากระบบส่งข้อมูลเหล่านี้ไม่ต้องอาศัยคลื่นพาห์ (carrier signal) ซึ่งก็คือสัญญาณรูปไซน์ ในการทดลองนี้และการทดลองถัด ๆ ไป เราจะพิจารณาการส่งข้อมูลที่แถบความถี่ผ่าน (passband) ซึ่งหมายถึงการใช้คลื่นพาห์มาส่งข้อมูล ทำให้แถบความถี่ของสัญญาณข้อมูลนั้นอยู่ในช่วงความถี่ของคลื่นพาห์

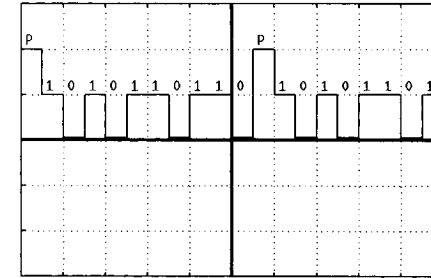
การส่งข้อมูลแบบ ASK (amplitude shift keying) เป็นการส่งบิตข้อมูลผ่านค่าแอมพลิจูด (ขนาดความกว้างวัดจากค่าเฉลี่ย) ของคลื่นพาห์ รูปข้างล่างแสดงตัวอย่างสัญญาณ ASK ที่ใช้ค่าแอมพลิจูดที่เป็นไปได้ 2 ค่า สำหรับส่งข้อมูล 1 บิต ได้แก่ 0.5 V (สำหรับบิต 1) และประมาณ 0 V (สำหรับบิต 0) โดยความถี่ของคลื่นพาห์คือ 4 kHz



2 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

เราสามารถมองการสร้างสัญญาณ ASK ในรูปข้างบน ด้วย 2 ขั้นตอนต่อไปนี้

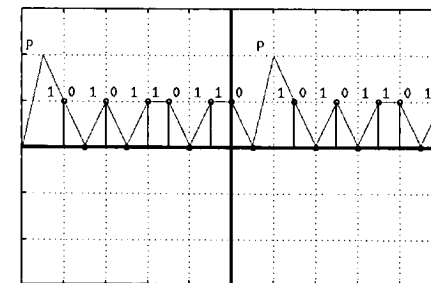
1. สร้างสัญญาณ PAM ที่แถบความถี่ฐาน โดยใช้พัลส์สี่เหลี่ยมและค่าสัญญาณ 0.5 V สำหรับบิต 1 ค่าสัญญาณ 0 V สำหรับบิต 0 และค่าสัญญาณ 1 V สำหรับสัญญาณนำ ผลลัพธ์ที่ได้เป็นสัญญาณที่แถบความถี่ฐานและเป็นไปดังแสดงในรูปข้างล่าง



2. คูณสัญญาณที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ด้วยคลื่นพาห์ ซึ่งได้แก่สัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ 4 kHz ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นไปดังแสดงในรูปสัญญาณ ASK ข้างบน การคูณสัญญาณที่แถบความถี่ฐานด้วยคลื่นพาห์เรียกว่าการทำให้ up-conversion เพราะเป็นการย้ายสัญญาณจากแถบความถี่ฐาน (ความถี่ต่ำ) ไปสู่แถบความถี่ผ่านที่ตั้งอยู่ ณ ความถี่ของคลื่นพาห์ (ความถี่สูง)

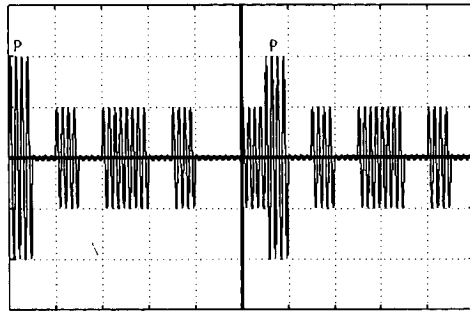
ตัวรับของระบบส่งข้อมูลแบบ ASK จะประมวลผลสัญญาณด้วย 2 ขั้นตอนต่อไปนี้

1. ย้ายสัญญาณจากแถบความถี่ผ่านที่ตั้งอยู่ ณ ความถี่ของคลื่นพาห์ (ความถี่สูง) กลับสู่แถบความถี่ฐาน (ความถี่ต่ำ) กระบวนการนี้เรียกว่า down-conversion ซึ่งสอดคล้องกับการคูณสัญญาณ ASK ด้วยคลื่นพาห์ แล้วใช้ตัวกรองความถี่ต่ำเก็บเฉพาะสัญญาณที่แถบความถี่ฐานไว้ ผลลัพธ์ที่ได้ (ในกรณีที่สัญญาณรบกวนต่ำ) จะตรงกับรูปของสัญญาณที่แถบความถี่ฐานข้างบน
2. ใช้ตัวกรองจับคู่ที่เป็นตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ โดยความกว้างของหน้าต่างค่าเฉลี่ยเท่ากับคาบของพัลส์สี่เหลี่ยมสำหรับสัญญาณที่แถบความถี่ฐาน จากนั้นทำการซิกค่าสัญญาณ (sampling) จากสัญญาณขาออกของตัวกรองจับคู่ ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ ค่าซิกสัญญาณ (sample) ที่มากกว่า 0.25 V หมายถึงบิต 1 และน้อยกว่า 0.25 V หมายถึงบิต 0



8.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง

1. พิจารณาถึงการส่งข้อมูลแบบ ASK ดังแสดงด้วยสัญญาณในรูปข้างล่างนี้



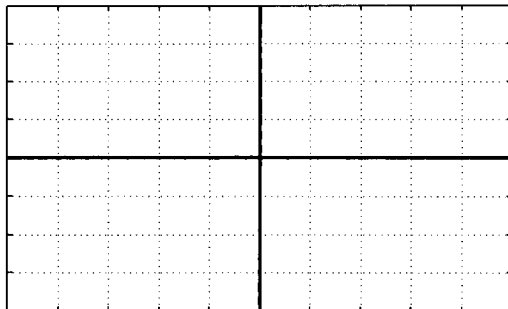
1 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

ในการส่งข้อมูลแบบมีสัญญาณนำสำหรับทุก ๆ กลุ่มของ 10 บิตข้อมูล อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งคือ

จากรูปบิตข้อมูล 10 บิตในแต่ละกลุ่มบิตคือ

ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) คือ

2. วาดรูปสัญญาณ ASK ที่ถูกส่งโดยมีสัญญาณนำ สำหรับบิต 1011010100 โดยใช้ค่าสัญญาณเหมือนกับในข้อ 1 แต่ใช้ความถี่ของคลื่นพาห์เป็นครึ่งหนึ่งของในข้อ 1 ใช้ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้สัญญาณนำอยู่ซ้ายสุดของรูป



8.4 การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ ASK

1. เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่งด้วยไฟล์ 108_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ 108_Rx.sof
2. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณ ASK สำหรับส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จักโดยใช้สวิตช์แบบเลื่อน 10 ตัว (SW9 ถึง SW0 บนอุปกรณ์ FPGA) กำหนดค่าบิต 10 บิตให้เท่ากับ 1010110110 จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับได้ โดยอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับจะแสดงค่าบิตผ่านแผงหลอดแอลอีดีจำนวน 10 หลอด

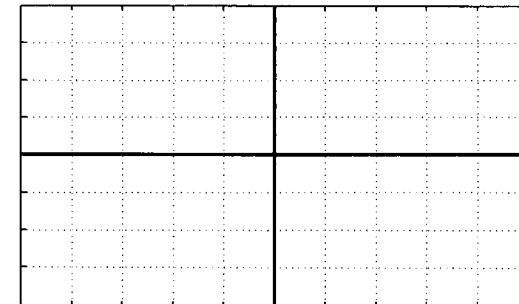
ค่าคาบของบิต (หน่วยเป็น s) ของการส่งข้อมูลคือ

ค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับได้คือ

ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) คือ

หมายเหตุ: นศ. ควรลองส่งค่าบิตอื่น ๆ ดู และตรวจสอบว่าตัวรับรับบิตได้อย่างถูกต้อง

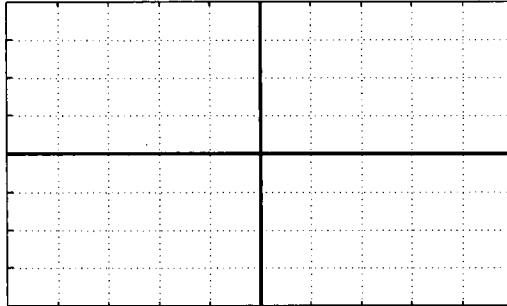
3. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วาดภาพสัญญาณที่ตัวรับรับได้ โดยตั้งค่าออสซิลโลสโคปที่ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div ให้คาบของสัญญาณนำอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด



4. ทำข้อ 3 ซ้ำแต่เลือกดูสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ที่ตัวรับ (แทนสัญญาณที่ตัวรับรับได้) โดยให้วาดรูปสัญญาณลงในภาพเดียวกับในข้อ 3

หมายเหตุ: การเลือกดูสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงสัญญาณที่ตัวรับรับได้ กดหนึ่งครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 2 ทางเลือก

5. ทำข้อ 3 และ 4 ซ้ำแต่ใช้คลื่นพาห้ที่ความถี่ 2 kHz



หมายเหตุ: การเลือกความถี่ของคลื่นพาห้ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวส่ง และกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON1 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงความถี่ 4 kHz กดหนึ่งครั้งหมายถึงความถี่ 2 kHz และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่างสองความถี่

นค. ควรลองส่งและรับบิตข้อมูลโดยกำหนดความถี่ของคลื่นพาห้ให้ต่างกันระหว่างตัวส่งและตัวรับ และสังเกตว่าถ้าความถี่ของคลื่นพาห้ไม่ตรงกัน จะไม่สามารถส่งบิตข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 9

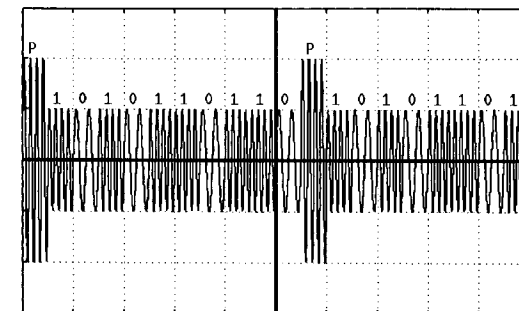
การส่งบิตข้อมูลแบบ FSK

9.1 วัตถุประสงค์

1. สามารถบ่งบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ FSK
2. สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ FSK จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ อัตราบิต และความถี่ของคลื่นพาห้
3. สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ FSK

9.2 ความรู้พื้นฐาน

การส่งข้อมูลแบบ FSK (frequency shift keying) เป็นการส่งบิตข้อมูลผ่านค่าความถี่ของคลื่นพาห้ รูปข้างล่างแสดงตัวอย่างสัญญาณ FSK ที่ใช้ความถี่ที่เป็นไปได้ 2 ค่าสำหรับส่งข้อมูล 1 บิต ได้แก่ 4 kHz (สำหรับบิต 1) และ 2 kHz (สำหรับบิต 0) จะเห็นได้ว่าการส่งข้อมูลแบบ FSK นั้นจะต้องอาศัยความถี่ของคลื่นพาห้มากกว่า 1 ค่า จากรูป สัญญาณนำใช้ความถี่ 4 kHz (สามารถใช้ความถี่ 2 kHz แทน 4 kHz ได้)



2 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

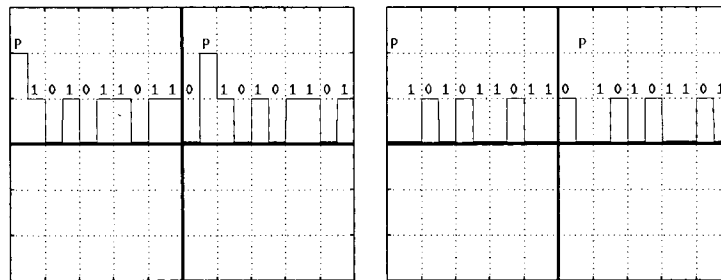
เราสามารถมองการสร้างสัญญาณ FSK ในรูปข้างบน ด้วย 2 ขั้นตอนต่อไปนี้

1. สร้างสัญญาณ PAM ที่แถบความถี่ฐาน 2 ชุดสำหรับ 2 ความถี่ของคลื่นพาห์

ที่ความถี่ 4 kHz ใช้พัลส์สี่เหลี่ยมและค่าสัญญาณ 0.5 V สำหรับบิต 1 ค่าสัญญาณ 0 V สำหรับบิต 0 และค่าสัญญาณ 1 V สำหรับสัญญาณนำ

ที่ความถี่ 2 kHz ใช้ค่าสัญญาณ 0 V สำหรับบิต 1 และสัญญาณนำ และค่าสัญญาณ 0.5 V สำหรับบิต 0

ผลลัพธ์ที่ได้เป็นสัญญาณที่แถบความถี่ฐาน 2 ชุด ดังแสดงในรูปข้างล่าง



สำหรับคลื่นพาห์ที่ 4 kHz

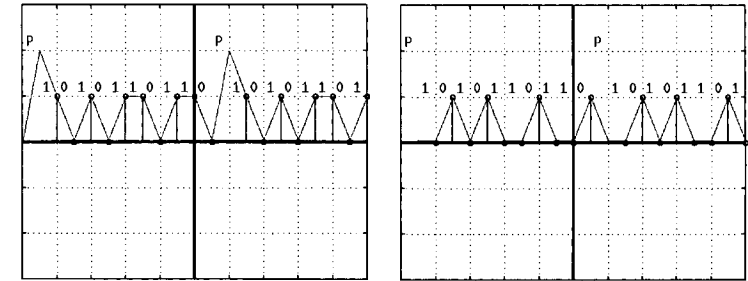
สำหรับคลื่นพาห์ที่ 2 kHz

2. ทำ up-conversion โดยการคูณสัญญาณที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ด้วยคลื่นพาห์ที่ 4 kHz และ 2 kHz ตามลำดับ จากนั้นบวกสัญญาณทั้งสองเข้าด้วยกัน ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นไปดังแสดงในรูปสัญญาณ ASK ข้างบน

ตัวรับของระบบส่งข้อมูลแบบ FSK จะประมวลผลสัญญาณด้วย 2 ขั้นตอนต่อไปนี้

1. ทำ down-conversion ย้ายสัญญาณจากแถบความถี่ผ่านที่ตั้งอยู่ ณ ความถี่ของคลื่นพาห์ (ความถี่สูง) กลับสู่แถบความถี่ฐาน (ความถี่ต่ำ) ผลลัพธ์ที่ได้ (ในกรณีที่สัญญาณรบกวนต่ำ) จากการทำ down-conversion 2 ครั้ง (สำหรับความถี่ของคลื่นพาห์ที่ 4 kHz และ 2 kHz ตามลำดับ) จะตรงกับรูปข้างบนของสัญญาณทั้งสองที่แถบความถี่ฐาน

2. ใช้ตัวกรองจับคู่สำหรับแต่ละสัญญาณที่แถบความถี่ฐาน จากนั้นทำการซัดค่าสัญญาณ (sampling) จากสัญญาณขาออกของตัวกรองจับคู่แต่ละตัว ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ ในแต่ละท่ายาบบิต ถ้าหากค่าซัดสัญญาณ (sample) ในรูปทางซ้ายมีมากกว่าค่าซัดสัญญาณในรูปทางขวามือ ตัวรับจะตัดสินว่าบิต 1 ถูกส่ง และจะตัดสินว่าบิต 0 ถูกส่งในกรณีที่น้อยกว่า



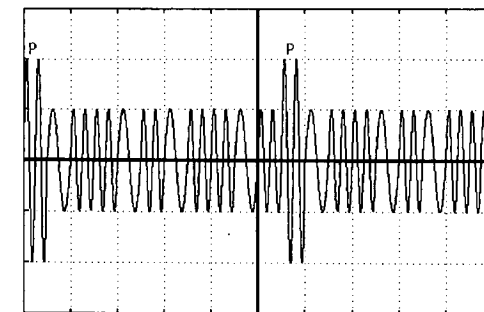
จากองค์ประกอบสัญญาณที่ 4 kHz

จากองค์ประกอบสัญญาณที่ 2 kHz

หมายเหตุ: ถึงแม้ว่าสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่สำหรับองค์ประกอบ 4 kHz (หรือ 2 kHz) เพียงตัวเดียว เพียงพอกับการตรวจจับบิตข้อมูล แต่การใช้สัญญาณทั้งสองรวมกันในการตรวจจับบิตข้อมูลจะลดอัตราบิดเบือนผลได้ในกรณีที่สัญญาณรบกวน

9.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง

1. พิจารณาถึงการส่งข้อมูลแบบ FSK ดังแสดงด้วยสัญญาณในรูปข้างล่างนี้ กำหนดให้สัญญาณความถี่สูงแทนบิต 1 และความถี่ต่ำแทนบิต 0 กำหนดให้สัญญาณนำใช้ความถี่สูงกว่า



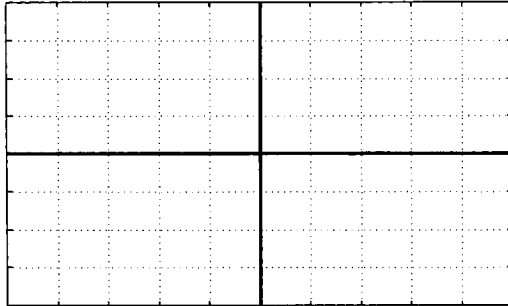
2 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

ในการส่งข้อมูลแบบมีสัญญาณนำสำหรับทุก ๆ กลุ่มของ 10 บิตข้อมูล อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งคือ

จากรูปบิตข้อมูล 10 บิตในแต่ละกลุ่มบิตคือ

ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) มี 2 ค่า คือ และ

2. วาดรูปสัญญาณ FSK ที่ถูกส่งโดยมีสัญญาณนำ สำหรับบิต 101010100 โดยใช้ค่าสัญญาณและความถี่ของคลื่นพาห์เหมือนกับในข้อ 1 ใช้ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้สัญญาณนำอยู่ซ้ายสุดของรูป



9.4 การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ FSK

1. เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่งด้วยไฟล์ 109_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ 109_Rx.sof
2. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณ FSK สำหรับส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จักโดยใช้สวิตช์แบบเลื่อน 10 ตัว (SW9 ถึง SW0 บนอุปกรณ์ FPGA) กำหนดค่าบิต 10 บิตให้เท่ากับ 1010110110 จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับได้ โดยอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับจะแสดงค่าบิตผ่านแผงหลอดแอลอีดีจำนวน 10 หลอด

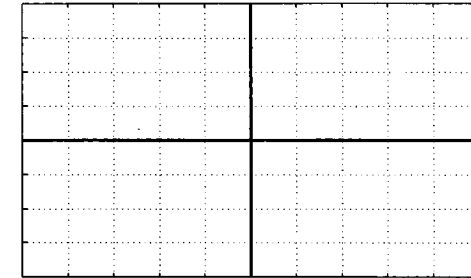
ค่าคาบของบิต (หน่วยเป็น s) ของการส่งข้อมูลคือ

ค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับได้คือ

ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) 2 ค่าคือ และ

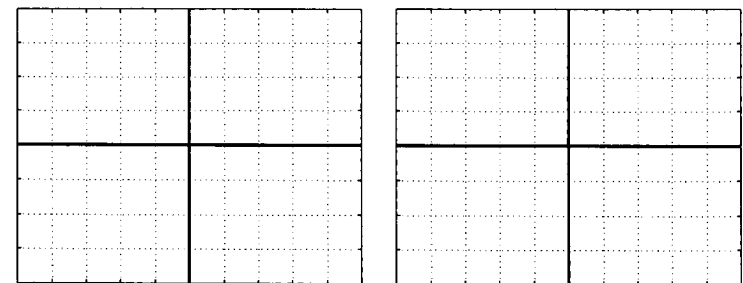
หมายเหตุ: นศ. ควรลองส่งค่าบิตอื่น ๆ ดู และตรวจสอบว่าตัวรับรับบิตได้อย่างถูกต้อง

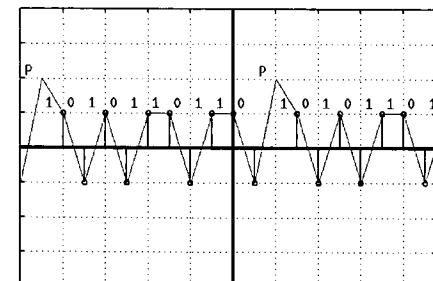
3. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วาดภาพสัญญาณที่ตัวรับรับได้ โดยตั้งค่าออสซิลโลสโคปที่ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div ให้คาบของสัญญาณนำอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด



4. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วาดภาพสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ที่ตัวรับ โดยวาดภาพสำหรับความถี่สูงในรูปซ้ายมือ และสำหรับความถี่ต่ำในรูปขวามือ ให้ตั้งค่าออสซิลโลสโคปที่ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้คาบของสัญญาณนำอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด

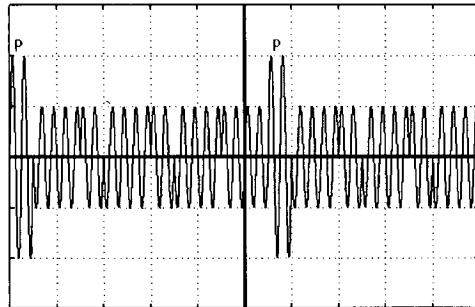
หมายเหตุ: การเลือกดูสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงสัญญาณที่ตัวรับรับได้ กดหนึ่งครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่สำหรับองค์ประกอบความถี่สูง กดสองครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่สำหรับองค์ประกอบความถี่ต่ำ และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 3 ทางเลือก





10.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง

- พิจารณาถึงการส่งข้อมูลแบบ BPSK ดังแสดงด้วยสัญญาณในรูปข้างล่างนี้ กำหนดให้ค่าเฟส 0 แทนบิต 1 และค่าเฟส π แทนบิต 0



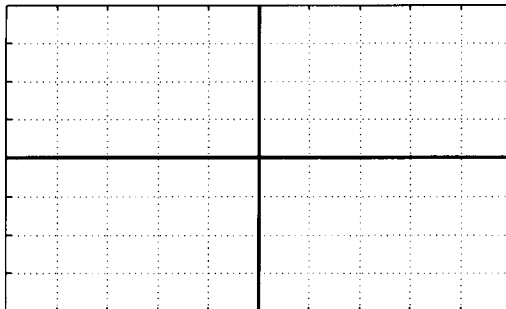
1 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

ในการส่งข้อมูลแบบมีสัญญาณนำสำหรับทุก ๆ กลุ่มของ 10 บิตข้อมูล อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งคือ

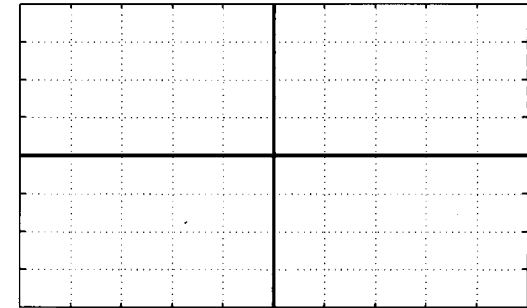
จากรูปบิตข้อมูล 10 บิตในแต่ละกลุ่มบิตคือ

ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) คือ

- วาดรูปสัญญาณ BPSK ที่ถูกส่งโดยมีสัญญาณนำ สำหรับบิต 1011010100 โดยใช้ค่าเฟสของสัญญาณและความถี่ของคลื่นพาห์เหมือนกับในข้อ 1 ใช้ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้สัญญาณนำอยู่ซ้ายสุดของรูป



- ทำข้อ 2 ซ้ำแต่เปลี่ยนคลื่นพาห์ให้มีความถี่น้อยลง 2 เท่า



10.4 การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ BPSK

- เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่งด้วยไฟล์ 110_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ 110_Rx.sof
- ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณ BPSK สำหรับส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จบโดยใช้สวิตช์แบบเลื่อน 10 ตัว (SW9 ถึง SW0 บนอุปกรณ์ FPGA) กำหนดค่าบิต 10 บิตให้เท่ากับ 1010110110 จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับได้ โดยอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับจะแสดงค่าบิตผ่านแผงหลอดแอลอีดีจำนวน 10 หลอด

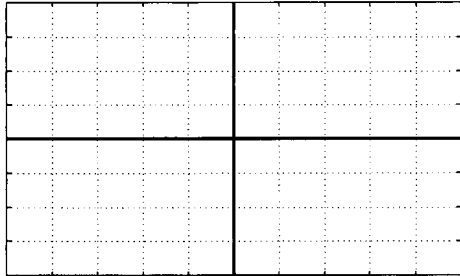
ค่าคาบของบิต (หน่วยเป็น s) ของการส่งข้อมูลคือ

ค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับได้คือ

ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) คือ

หมายเหตุ: นศ. ควรลองส่งค่าบิตอื่น ๆ ดู และตรวจสอบว่าตัวรับรับบิตได้อย่างถูกต้อง

3. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วาดภาพสัญญาณที่ตัวรับได้ โดยตั้งค่าออสซิลโลสโคปที่ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div ให้ค่าของสัญญาณน้อยอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด



4. ทำข้อ 3 ซ้ำแต่เลือกสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ที่ตัวรับ (แทนสัญญาณที่ตัวรับได้) โดยให้วาดรูปสัญญาณลงในภาพเดียวกับในข้อ 3

หมายเหตุ: การเลือกดูสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงสัญญาณที่ตัวรับได้ กดหนึ่งครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 2 ทางเลือก

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 11

การส่งบิตข้อมูลแบบ QAM (ตอนที่ 1/2)

11.1 วัตถุประสงค์

1. สามารถบ่งบอกบิตข้อมูลและอัตราบิตจากรูปสัญญาณ QPSK ซึ่งเป็นกรณีหนึ่งของสัญญาณ QAM
2. สามารถวาดภาพสัญญาณข้อมูลแบบ QPSK จากบิตข้อมูล ค่าสัญญาณ อัตราบิต และความถี่ของคลื่นพาห้
3. สามารถแยกส่วนประกอบอินเฟส (in-phase) และส่วนประกอบควอดเรเจอร์ (quadrature) จากสัญญาณ QPSK ได้

11.2 ความรู้พื้นฐาน

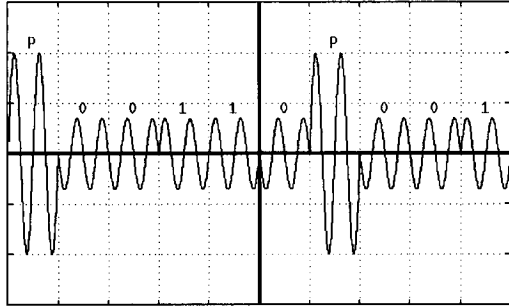
พิจารณาถึงการส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จัก โดยใช้คลื่นพาห้รูปไซน์ (sine) และคลื่นพาห้รูปโคไซน์ (cosine) ในเวลาเดียวกัน บิตข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดหนึ่งส่งโดยการทำ PAM แล้วนำมาทำ up-conversion ด้วยคลื่นพาห้รูปไซน์ อีกชุดหนึ่งส่งโดยการทำ PAM แล้วนำมาทำ up-conversion บนคลื่นรูปโคไซน์ การส่งแบบดังกล่าว เปรียบเสมือนการส่งข้อมูลไปพร้อม ๆ กัน 2 ระบบ

1. ระบบที่ 1 ส่งด้วยคลื่นพาห้รูปไซน์ สัญญาณจากระบบนี้เรียกว่าส่วนประกอบอินเฟส (in-phase)
2. ระบบที่ 2 ส่งด้วยคลื่นพาห้รูปโคไซน์ สัญญาณจากระบบนี้เรียกว่าส่วนประกอบควอดเรเจอร์ (quadrature)
3. ส่วนประกอบอินเฟส และส่วนประกอบควอดเรเจอร์ จะถูกนำมาบวกกันแล้วส่งเป็นสัญญาณข้อมูลแบบ QAM (quadrature amplitude modulation)

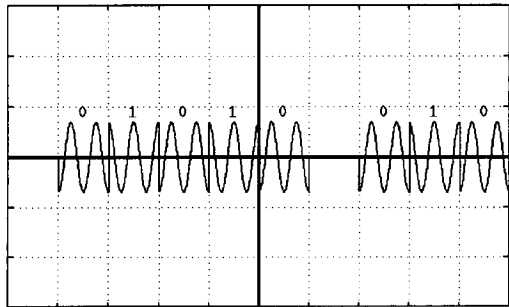
ในแต่ละระบบ ค่าสัญญาณจะเป็น $0.5/\sqrt{2} \approx 0.354$ V สำหรับบิต 1 และเป็น -0.354 V สำหรับบิต 0 ดังแสดงในรูปข้างล่างสำหรับบิตข้อมูล 00110 ในส่วนประกอบอินเฟส และบิตข้อมูล 01010 ในส่วนประกอบควอดเรเจอร์ กำหนดให้ค่าความถี่ของคลื่นพาห้เท่ากับ 2 kHz กำหนดให้แอมพลิจูดของสัญญาณนำเป็น 2 เท่าของแอมพลิจูดของสัญญาณรวมที่เป็นส่วนของข้อมูล ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้

หมายเหตุ: เนื่องจากสัญญาณรูปไซน์ที่มีแอมพลิจูด $0.5/\sqrt{2}$ V และสัญญาณรูปโคไซน์ที่มีแอมพลิจูด $0.5/\sqrt{2}$ V บวกกันแล้วจะได้สัญญาณรูปไซน์ (ที่มีค่าเลื่อนเฟส) ที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ 0.5 V เราจึงนำ $\sqrt{2}$ ไปหารค่า 0.5 V ของส่วนประกอบอินเฟส และส่วนประกอบควอดเรเจอร์ เพื่อให้ผลบวกมีแอมพลิจูด 0.5 V ตามต้องการ

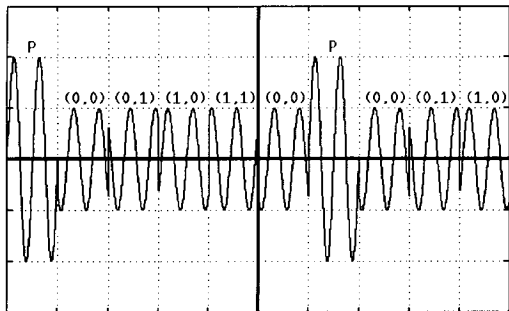
การส่งส่วนประกอบอินเฟส และส่วนประกอบควอเทรเจอร์ ไปพร้อม ๆ กัน ทำให้แต่ละคาบของการส่งสัญญาณส่งข้อมูลได้ 2 บิต ดังนั้นเราจึงเรียกข้อมูลในการส่งแต่ละคาบว่าสัญลักษณ์ (Symbol) โดย 1 สัญลักษณ์ QAM ในตัวอย่างนี้ประกอบไปด้วย 2 บิตข้อมูล บิตแรกมาจากส่วนประกอบอินเฟส และบิตที่สองมาจากส่วนประกอบควอเทรเจอร์



ส่วนประกอบอินเฟส โดย P แทนสัญญาณนำ (1 ms/Div และ 0.5 V/Div)



ส่วนประกอบควอเทรเจอร์ (1 ms/Div และ 0.5 V/Div)



สัญญาณ QAM จากการบวกส่วนประกอบอินเฟสและควอเทรเจอร์ (1 ms/Div และ 0.5 V/Div)

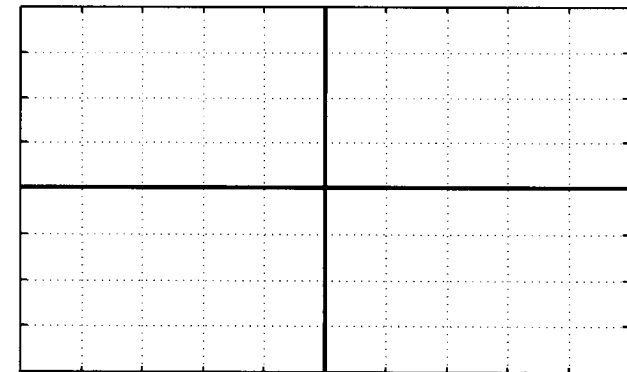
จากรูป จะสังเกตได้ว่าผลบวกของส่วนประกอบอินเฟส และส่วนประกอบควอเทรเจอร์ ให้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณที่มีความถี่เดิม (2 kHz) และมีแอมพลิจูด 0.5 V แต่มีความเป็นไปได้อย่างค่าเฟสในแต่ละคาบสัญลักษณ์ทั้งหมด 4 ค่าดังต่อไปนี้ (ดูค่าเฟสได้จากกรุปสัญญาณ QAM)

ค่าบิตในสัญลักษณ์ QAM	ค่าเฟสของคลื่นพาห้
(0, 0)	$5\pi/4$
(0, 1)	$3\pi/4$
(1, 0)	$7\pi/4$
(1, 1)	$\pi/4$

ดังนั้น สัญญาณ QAM ที่แสดงในรูปข้างบน ซึ่งสอดคล้องกับการทำ PSK ด้วยค่าเฟส 4 ค่า จึงถูกเรียกว่าสัญญาณ QPSK (quadrature PSK) อย่างไรก็ตาม สัญญาณ QPSK นี้เป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งของสัญญาณ QAM เท่านั้น อีกตัวอย่างของสัญญาณ QAM ได้แก่ 8-PSK ซึ่งเป็นการทำ PSK ด้วยค่าเฟส 8 ค่า (แทน 4 ค่าดังเช่นใน QPSK)

11.3 การแสดงบิตข้อมูลด้วยสัญญาณแบบ QPSK

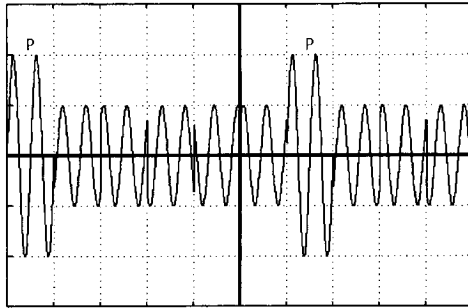
จากรูปสัญญาณ QPSK สำหรับการส่งสัญลักษณ์ (0, 0) (0, 1) (1, 0) และ (1, 1) ในรูปเดียวกัน สมมติให้คาบของสัญลักษณ์เท่ากับ 1 ms ใช้คลื่นพาห้ที่มีความถี่ 2 kHz กำหนดให้แอมพลิจูดของสัญญาณ QPSK เท่ากับ 0.5 V ใช้ 0.1 ms/Div และ 0.25 V/Div และให้คาบของสัญลักษณ์เริ่มทางซ้ายสุดของรูป



หมายเหตุ: ค่าตอบควรมีเส้นกราฟ 4 เส้นสำหรับ 4 กรณีของสัญลักษณ์ อยู่ในรูปเดียวกัน

11.4 การอ่านบิตข้อมูลและการแยกส่วนประกอบของสัญญาณ QPSK

- พิจารณาถึงการส่งข้อมูลแบบ QPSK ดังแสดงด้วยสัญญาณในรูปข้างล่างนี้ กำหนดให้ค่าเฟสของสัญญาณเป็นไปตามตารางค่าเฟสในหัวข้อที่แล้ว



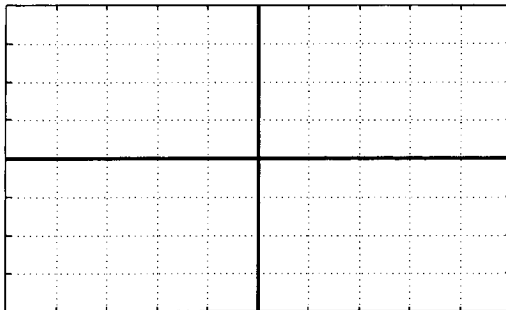
1 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย P แทนสัญญาณนำ

ในการส่งข้อมูลแบบมีสัญญาณนำสำหรับทุก ๆ กลุ่มของ 10 บิตข้อมูล อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งคือ

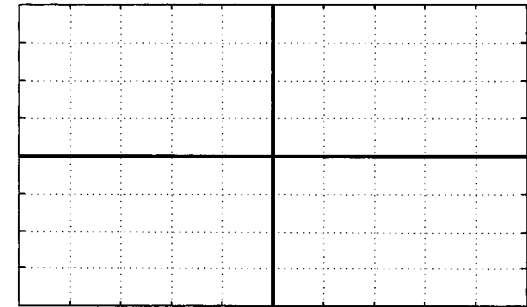
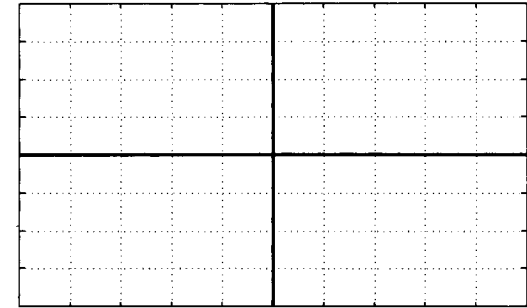
จากรูปบิตข้อมูล 10 บิตในแต่ละกลุ่มบิตคือ

ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) คือ

- วาดรูปสัญญาณ QPSK ที่ถูกส่งโดยมีสัญญาณนำ สำหรับบิต 1011010100 โดยใช้ค่าเฟสของสัญญาณและความถี่ของคลื่นพาห์เหมือนกับในข้อ 1 ใช้ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้สัญญาณนำอยู่ซ้ายสุดของรูป



- ทำข้อ 3 ข้างแต่วาดเฉพาะส่วนประกอบอินเฟส (แทนสัญญาณ QPSK) ในรูปบน และส่วนประกอบควอดเรเจอร์ (แทนสัญญาณ QPSK) ในรูปล่าง



กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 12

การส่งบิตข้อมูลแบบ QAM (ตอนที่ 2/2)

12.1 วัตถุประสงค์

1. สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ QPSK
2. สามารถจับคู่ระหว่างค่าบิตข้อมูล และค่าสัญญาณใน constellation diagram สำหรับสัญญาณ QAM
3. สามารถบ่งบอกอัตราบิตการส่งข้อมูลจาก constellation diagram และคาบของสัญญาณได้

12.2 ความรู้พื้นฐาน

กิจกรรมที่ผ่านมา เกี่ยวข้องกับการสร้างสัญญาณ QAM ในฝั่งตัวส่ง ด้วยคลื่นพาหะรูปไซน์และรูปโคไซน์ ที่ความถี่เดียวกัน ในฝั่งรับ ตัวรับของระบบส่งข้อมูลแบบ QAM จะประมวลผลสัญญาณด้วย 2 ขั้นตอนต่อไปนี้

1. ทำ down-conversion ย้ายสัญญาณจากแถบความถี่ผ่านที่ตั้งอยู่ ณ ความถี่ของคลื่นพาหะ (ความถี่สูง) กลับสู่แถบความถี่ฐาน (ความถี่ต่ำ)

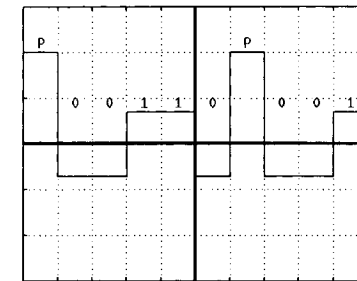
โดยจะมีการทำ down-conversion ด้วยการคูณสัญญาณที่ตัวรับได้กับคลื่นพาหะรูปไซน์ แล้วกรองผลลัพธ์การคูณด้วยตัวกรองความถี่ต่ำ (lowpass filter) เพื่อให้ได้ส่วนประกอบอินเฟสของสัญญาณ QAM กลับคืนมาที่แถบความถี่ฐาน

และทำ down-conversion ด้วยการคูณสัญญาณที่ตัวรับได้กับคลื่นพาหะรูปโคไซน์ แล้วกรองผลลัพธ์การคูณด้วยตัวกรองความถี่ต่ำ เพื่อให้ได้ส่วนประกอบควอดเรเจอร์ของสัญญาณ QAM กลับคืนมาที่แถบความถี่ฐาน

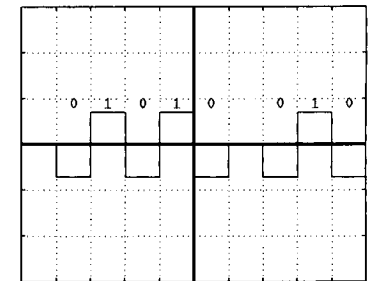
ผลลัพธ์ที่ได้จะสอดคล้องกับสัญญาณ PAM ที่ความถี่ฐาน ของส่วนประกอบอินเฟส และของส่วนประกอบควอดเรเจอร์ ตามลำดับ

2. ใช้ตัวกรองจับคู่สำหรับสัญญาณ PAM แต่ละสัญญาณ (ของส่วนประกอบอินเฟส และของส่วนประกอบควอดเรเจอร์) จากนั้นทำการชักค่าสัญญาณ (sampling) จากสัญญาณขาออกของตัวกรองจับคู่แต่ละตัว ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ ในแต่ละส่วนประกอบ ค่าชักสัญญาณ (sample) ที่เป็นบวกหมายถึงบิต 1 และเป็นลบหมายถึงบิต 0

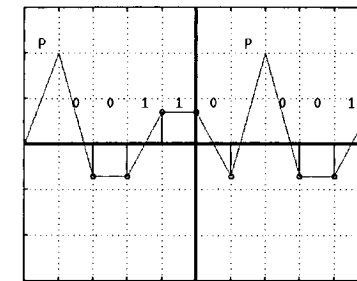
หมายเหตุ: เนื่องจากตัวกรองจับคู่นี้มีคุณสมบัติเป็นตัวกรองความถี่ต่ำด้วย ทำให้เราสามารถยกเว้นการใช้ตัวกรองความถี่ต่ำในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้ตัวกรองจับคู่หลังการทำ down-conversion ได้เลย



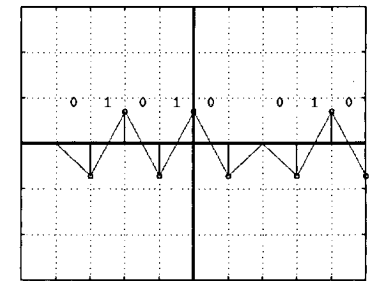
สัญญาณ PAM จากการทำ down-conversion (อินเฟส)



สัญญาณ PAM จากการทำ down-conversion (ควอดเรเจอร์)



สัญญาณจากตัวกรองจับคู่ (อินเฟส)



สัญญาณจากตัวกรองจับคู่ (ควอดเรเจอร์)

12.3 การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยสัญญาณแบบ QPSK

1. เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่ง ด้วยไฟล์ 112_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ 112_Rx.sof
2. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณ QPSK สำหรับส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จบโดยใช้สวิตช์แบบเลื่อน 10 ตัว (SW9 ถึง SW0 บนอุปกรณ์ FPGA) กำหนดค่าบิต 10 บิตให้เท่ากับ 1010110110 โดย 5 บิตแรกเป็นส่วนประกอบอินเฟส และ 5 บิตหลังเป็นส่วนประกอบควอดเรเจอร์ จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับได้ โดยอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับจะแสดงค่าบิตผ่านแผงหลอดแอลอีดีจำนวน 10 หลอด

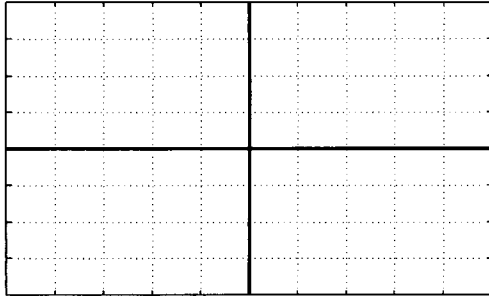
ค่าคาบของบิต (หน่วยเป็น s) ของการส่งข้อมูลคือ

ค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับได้คือ

ความถี่ของคลื่นพาหะที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) คือ

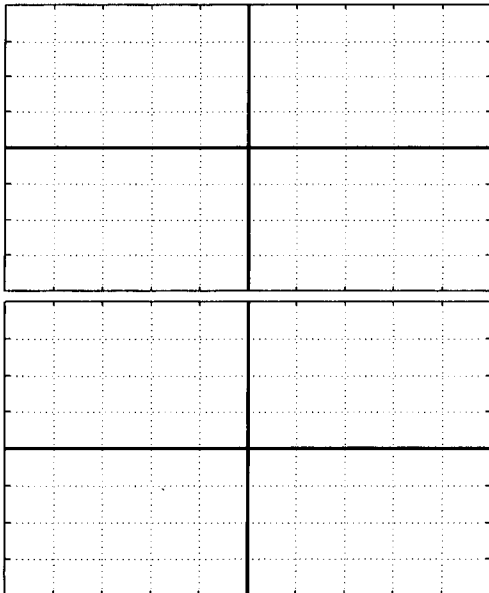
หมายเหตุ: นศ. ควรลองส่งค่าบิตอื่น ๆ ดู และตรวจสอบว่าตัวรับรับบิตได้อย่างถูกต้อง

3. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วาดภาพสัญญาณที่ตัวรับได้ โดยตั้งค่าออสซิลโลสโคปที่ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div ให้คาบของสัญญาณน้อยอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด



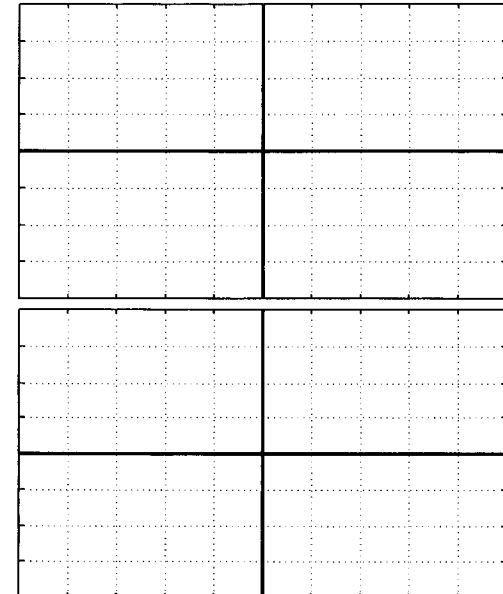
4. ทำข้อ 3 ซ้ำ แต่กำหนดให้ตัวส่ง ๆ เฉพาะส่วนประกอบอินเฟสในรูปบน และกำหนดให้ ตัวส่ง ๆ เฉพาะส่วนประกอบควอเดรเจอร์ในรูปล่าง

หมายเหตุ: การเลือกส่งสัญญาณที่ตัวส่ง ทำได้โดยการกดสวิทช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวส่ง โดยก่อนกดหมายถึงสัญญาณ QPSK กดหนึ่งครั้งหมายถึงส่วนประกอบอินเฟส กดสองครั้งหมายถึงส่วนประกอบควอเดรเจอร์ และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 3 ทางเลือก



5. ทำข้อ 3 ซ้ำ โดยกำหนดให้ตัวส่งส่งสัญญาณ QPSK แต่ให้วาดสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ที่ตัวรับ โดยวาดภาพสำหรับส่วนประกอบอินเฟสในรูปบน และสำหรับส่วนประกอบควอเดรเจอร์ในรูปล่าง

หมายเหตุ: การเลือกดูสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิทช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงสัญญาณที่ตัวรับได้ กดหนึ่งครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของส่วนประกอบอินเฟส กดสองครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของส่วนประกอบควอเดรเจอร์ และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 3 ทางเลือก



12.4 การใช้ค่าสัญญาณ QAM ใน Constellation diagram

- ค่าสัญญาณของแต่ละสัญลักษณ์สำหรับ QAM นั้นจะมีส่วนประกอบอินเฟส และส่วนประกอบควอดเรเจอร์ ซึ่งสำหรับ QPSK ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อกิจกรรมที่แล้ว แต่ละส่วนประกอบจะมีค่าเท่ากับ $0.5/\sqrt{2} \approx 0.354$ V หรือ -0.354 ขึ้นอยู่กับบิตข้อมูล

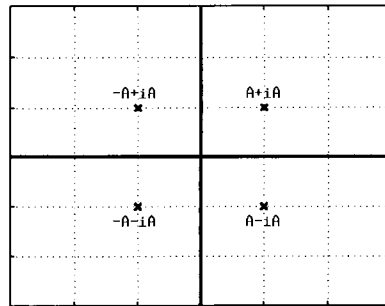
เพื่อความสะดวก ค่าของสัญญาณสำหรับสัญลักษณ์ QAM มักถูกแสดงด้วยจำนวนเชิงซ้อน (complex number) โดยที่ค่าของส่วนประกอบอินเฟสจะเป็นส่วนจริง (real part) และค่าของส่วนประกอบควอดเรเจอร์จะเป็นส่วนจินตภาพ (imaginary part)

หมายเหตุ: กำหนดให้ i เป็นจำนวนที่ทำให้ $i^2 = -1$ จำนวนเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงเท่ากับ x และส่วนจินตภาพเท่ากับ y เขียนแทนได้ด้วย $x + iy$

ดังนั้น ค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4 ค่าของแต่ละสัญลักษณ์สำหรับ QPSK มีดังต่อไปนี้ (กำหนดให้ $A = 0.354$)

$$A + iA, -A + iA, -A - iA, A - iA$$

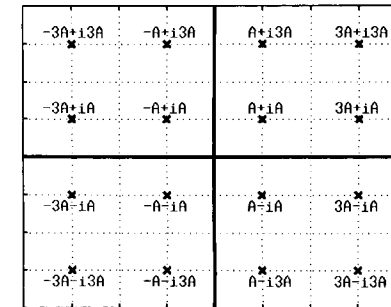
และแสดงในระนาบจำนวนเชิงซ้อน (complex plane) ได้ดังรูปข้างล่างนี้ โดยแกนนอนแสดงค่าของส่วนประกอบอินเฟส (ส่วนจริง) และแกนตั้งแสดงค่าของส่วนประกอบควอดเรเจอร์ (ส่วนจินตภาพ)



รูปแสดงค่าสัญญาณของ QAM ในลักษณะนี้เรียกว่า *constellation diagram* ซึ่งแปลตามคำศัพท์หมายถึงถึงแผนภาพกลุ่มดาว โดยเราสามารถมองว่าจุดของค่าสัญญาณ (กากบาท 4 จุดในภาพ) เปรียบเสมือนกลุ่มดาว และระนาบจำนวนเชิงซ้อนเปรียบเสมือนท้องฟ้า

- การส่งแบบ QPSK นั้นจะสามารถส่งบิตข้อมูลได้จำนวน 2 บิตต่อสัญลักษณ์ เนื่องจากค่าบิตข้อมูล 2 บิต มีทั้งหมด $2 \times 2 = 2^2 = 4$ ค่า เราจึงเรียก QPSK ว่าเป็นการส่งแบบ 4-QAM ได้ด้วย โดยทั่วไปถ้า constellation diagram มีค่าสัญญาณทั้งหมด M ค่า จะเรียกการส่งข้อมูลว่าเป็นแบบ M -QAM

รูปข้างล่างแสดง constellation diagram ของ 16-QAM สำหรับการส่งบิตข้อมูล 4 บิตต่อสัญลักษณ์ ซึ่งมีค่าสัญญาณทั้งหมด $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 2^4 = 16$ ค่า



หมายเหตุ: ค่าของสัญญาณห่างกันอย่างน้อยเท่ากับระยะ $2A$ ในระนาบจำนวนเชิงซ้อน

ถ้าเราส่งข้อมูลด้วยอัตราบิต 1 kbps (สมมติว่าไม่มีการใช้สัญญาณนำ) ด้วย QPSK การเปลี่ยนจาก QPSK เป็น 16-QAM และใช้คาบสัญญาณ QAM เท่าเดิม จะทำให้อัตราบิตของข้อมูลที่ถูกส่งเพิ่มขึ้นจาก 1 kbps เป็น

- ถ้าต้องการส่งข้อมูลจำนวน 6 บิตต่อสัญลักษณ์

จะต้องใช้ constellation diagram ที่มีค่าสัญญาณทั้งหมด ค่า

การส่งข้อมูลแบบนี้เรียกว่า -QAM

ถ้าเราส่งข้อมูลด้วย constellation ดังกล่าว และใช้คาบสัญญาณ 1 ms จะทำให้อัตราบิตของข้อมูลที่ถูกส่ง (หน่วยเป็น bps) เท่ากับ

- ถ้าต้องการส่งข้อมูลจำนวน 8 บิตต่อสัญลักษณ์

จะต้องใช้ constellation diagram ที่มีค่าสัญญาณทั้งหมด ค่า

การส่งข้อมูลแบบนี้เรียกว่า -QAM

ถ้าเราส่งข้อมูลด้วย constellation ดังกล่าว และใช้คาบสัญญาณ 1 ms (สมมติว่าไม่มีการใช้สัญญาณนำ) จะทำให้อัตราบิตของข้อมูลที่ถูกส่ง (หน่วยเป็น bps) เท่ากับ

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 13

การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA และ FDMA

13.1 วัตถุประสงค์

1. สามารถแสดงสัญญาณจากผู้ใช้งานแต่ละคน สำหรับการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA
2. สามารถแสดงสัญญาณจากผู้ใช้งานหลายคน สำหรับการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ FDMA
3. สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA
4. สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ FDMA

13.2 ความรู้พื้นฐาน

พิจารณาถึงการส่งบิตข้อมูลจากผู้ใช้งานหลายคนผ่านสายส่งเส้นเดียวกัน หรือที่เรียกว่าการร่วมใช้ช่องสัญญาณ (multiple access) ซึ่งทำได้หลายวิธี

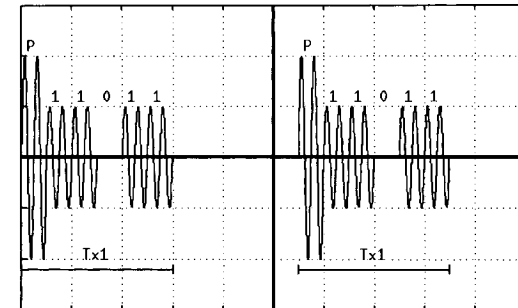
การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA (time division multiple access) เป็นการแบ่งการใช้สื่อ (ในการทดลองนี้คือสายส่ง) ในเชิงเวลา รูปข้างล่างนี้แสดงให้เห็นถึงการสลับกันส่งข้อมูลทีละ 5 บิตระหว่างผู้ใช้งาน 2 คน เพื่อต่อการสังเกต แต่ละตัวส่งได้ส่งบิตข้อมูล 5 ตัวซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จบ ถึงแม้ว่าการส่งข้อมูลจะเป็นแบบ ASK ในรูป แต่การส่งแบบอื่น ๆ (เช่น FSK PSK และ QAM) ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เช่นเดียวกัน

นศ. ควรจะสังเกตว่า ในการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA นั้น สัญญาณจากตัวส่งทั้งสองตัวไม่ทับซ้อนกันในเชิงเวลา สำหรับบิตข้อมูลที่ถูกลงและอัตราบิตข้อมูลนั้น พิจารณาได้ดังนี้

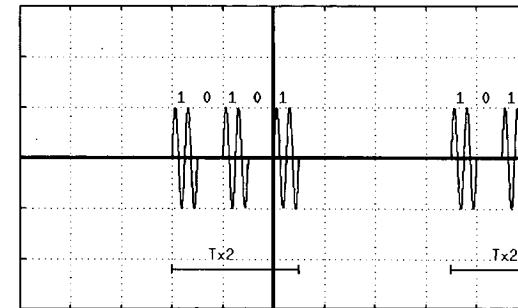
- จากรูป บิตข้อมูล 5 บิตที่ถูกลงจากผู้ใช้งานคนที่ 1 ได้แก่ 11011
- จากรูป บิตข้อมูล 5 บิตที่ถูกลงจากผู้ใช้งานคนที่ 2 ได้แก่ 10101
- เนื่องจากข้อมูล 5 บิตถูกลงจากผู้ใช้งานแต่ละคนในเวลา 11 ms อัตราบิตข้อมูลที่ถูกลงสำหรับผู้ใช้งานแต่ละคนคือ

$$\frac{5 \text{ bit}}{21 \text{ ms}} \approx 0.238 \text{ kbps}$$

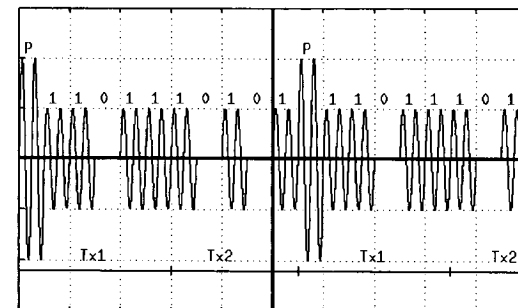
- อัตราบิตข้อมูลที่ถูกลงโดยรวมคือ $\approx 2 \times 0.238 = 0.476 \text{ kbps}$



สัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 1 โดย P แทนสัญญาณนำ (2 ms/Div และ 0.5 V/Div)



สัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 2 (2 ms/Div และ 0.5 V/Div)

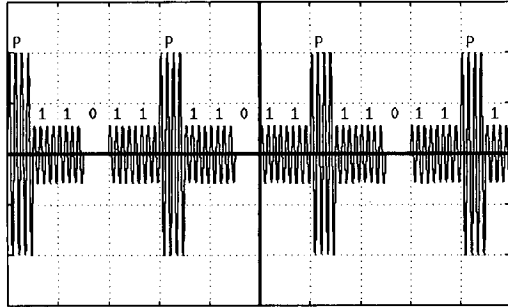


สัญญาณจากการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA (2 ms/Div และ 0.5 V/Div) ซึ่งมาจากการบวกสัญญาณจากผู้ใช้งาน 2 คนเข้าด้วยกัน

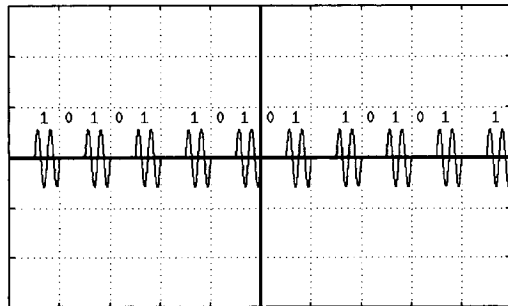
13.2. ความรู้พื้นฐาน

71

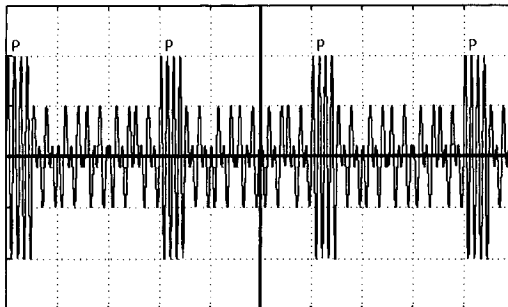
การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ FDMA (frequency division multiple access) เป็นการแบ่งการใช้สื่อนำในเชิงความถี่ รูปข้างล่างนี้แสดงให้เห็นถึงการร่วมกันใช้สื่อนำสำหรับส่งข้อมูล 5 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จบจากผู้ใช้งาน 2 คน โดยใช้คลื่นพาหะที่มีความถี่ 4 และ 2 kHz ตามลำดับ



สัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 1 โดย P คือสัญญาณนำ (2 ms/Div และ 0.5 V/Div)



สัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 2 (2 ms/Div และ 0.5 V/Div)



สัญญาณจากการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ FDMA (2 ms/Div และ 0.5 V/Div)
ซึ่งมาจากการบวกสัญญาณจากผู้ใช้งาน 2 คนเข้าด้วยกัน

72

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 13. การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA และ FDMA

นศ. ควรจะสังเกตว่า ในการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ FDMA นั้น สัญญาณจากตัวส่งทั้งสองตัวทับซ้อนกันในเชิงเวลา อย่างไรก็ตามสัญญาณทั้งสองใช้คลื่นพาหะที่มีความถี่ต่างกัน จึงไม่ทับซ้อนในเชิงความถี่ สำหรับบิตข้อมูลที่ถูกส่งและอัตราบิตข้อมูลนั้น พิจารณาได้ดังนี้

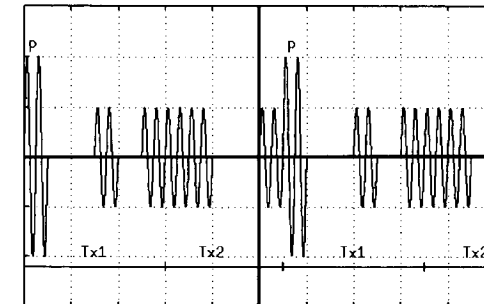
- จากรูป บิตข้อมูล 5 บิตที่ถูกส่งจากผู้ใช้งานคนที่ 1 ได้แก่ 11011
- จากรูป บิตข้อมูล 5 บิตที่ถูกส่งจากผู้ใช้งานคนที่ 2 ได้แก่ 10101
- เนื่องจากข้อมูล 5 บิตถูกส่งจากผู้ใช้งานแต่ละคนในเวลา 11 ms อัตราบิตของแต่ละคนคือ

$$\frac{5 \text{ bit}}{21 \text{ ms}} \approx 0.238 \text{ kbps}$$

- อัตราบิตข้อมูลที่ถูกรวมคือ $\approx 2 \times 0.238 = 0.476 \text{ kbps}$

13.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง

1. พิจารณาถึงการส่งข้อมูลจากผู้ใช้งาน 2 ที่ร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ กำหนดให้สัญญาณจากผู้ใช้งานแต่ละคนเป็นแบบ ASK โดย 5 บิตแรกของแต่ละกลุ่มบิตจำนวน 10 บิตจากผู้ใช้งานคนที่ 1 และ 5 บิตหลังของแต่ละกลุ่มบิตมาจากผู้ใช้งานคนที่ 2 สัญญาณข้อมูลของแต่ละกลุ่มบิตอยู่ระหว่างสัญญาณนำ



สัญญาณ TDMA (1 ms/Div และ 0.5 V/Div)

จากรูป บิตข้อมูล 5 บิตที่ถูกส่งจากผู้ใช้งานคนที่ 1 ได้แก่

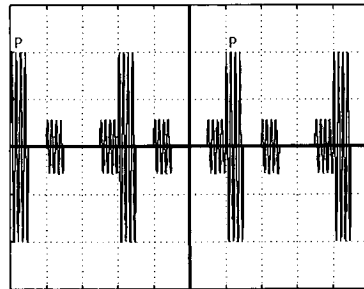
จากรูป บิตข้อมูล 5 บิตที่ถูกส่งจากผู้ใช้งานคนที่ 2 ได้แก่

ความถี่ของคลื่นพาหะที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) คือ

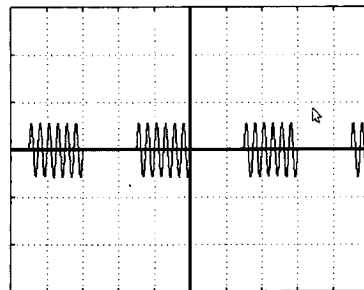
อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งสำหรับผู้ใช้งานแต่ละคนคือ

อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งโดยรวมคือ

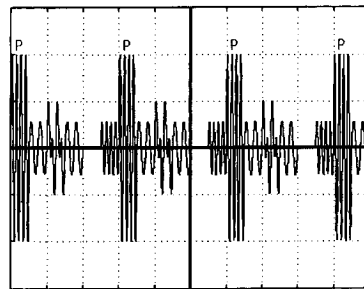
2. พิจารณาถึงการส่งข้อมูลจากผู้ใช้งาน 2 ที่ร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ FDMA ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ กำหนดให้สัญญาณจากผู้ใช้งานแต่ละคนเป็นแบบ ASK โดยผู้ใช้งานแต่ละคนส่งข้อมูล 5 บิต (5 บิตแรกจากผู้ใช้งานคนที่ 1 และ 5 บิตหลังจากผู้ใช้งานคนที่ 2)



สัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 1 (1 ms/Div และ 0.5 V/Div)



สัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 2 (1 ms/Div และ 0.5 V/Div)



สัญญาณ FDMA (1 ms/Div และ 0.5 V/Div)

จากรูป บิตข้อมูล 5 บิตที่ถูกส่งจากผู้ใช้งานคนที่ 1 ได้แก่ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

จากรูป บิตข้อมูล 5 บิตที่ถูกส่งจากผู้ใช้งานคนที่ 2 ได้แก่ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) 2 ค่าคือ และ

อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งสำหรับผู้ใช้งานแต่ละคนคือ

อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งโดยรวมคือ

13.4 การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับโดยการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA และ FDMA

1. เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่งด้วยไฟล์ 113_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ 113_Rx.sof
2. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งส่งบิตข้อมูล 5 บิตซ้ำ ๆ กันจำนวน 2 ชุด (สมมติว่ามาจากผู้ใช้งาน 2 คน) แบบไม่รู้จัก โดยใช้สวิตช์แบบเลื่อน 5 ตัวแรก (SW9 ถึง SW5 บนอุปกรณ์ FPGA) ของตัวส่งกำหนดค่าบิตชุดที่ 1 ให้เท่ากับ 11011 และใช้สวิตช์แบบเลื่อน 5 ตัวหลัง (SW4 ถึง SW0 บนอุปกรณ์ FPGA) กำหนดค่าบิตชุดที่ 2 ให้เท่ากับ 10101 และกำหนดวิธีการร่วมใช้ช่องสัญญาณให้เป็นแบบ TDMA

หมายเหตุ: การเลือกสัญญาณที่ถูกส่งจากตัวส่ง ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวส่ง โดยการกดสวิตช์ เป็นการสลับไปมาระหว่างสัญญาณต่อไปนี้

ชื่อสัญญาณบน FPGA	วิธีการร่วมใช้ช่องสัญญาณ	ตัวส่งสัญญาณ
t1	TDMA	ผู้ใช้งานคนที่ 1 เท่านั้น
t2	TDMA	ผู้ใช้งานคนที่ 2 เท่านั้น
t	TDMA	ผู้ใช้งานคนที่ 1 และ 2
f1	FDMA	ผู้ใช้งานคนที่ 1 เท่านั้น
f2	FDMA	ผู้ใช้งานคนที่ 2 เท่านั้น
f	FDMA	ผู้ใช้งานคนที่ 1 และ 2

หมายเหตุ: การเลือกดูสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงสัญญาณที่ตัวรับรับได้ กดหนึ่งครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่สำหรับคลื่นพาห์ที่ความถี่ 4 kHz กดสองครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่สำหรับคลื่นพาห์ที่ความถี่ 2 kHz และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 3 ทางเลือก

การเลือกวิธีร่วมใช้ช่องสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON1 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึง TDMA กดหนึ่งครั้งหมายถึง FDMA และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 2 ทางเลือกนี้

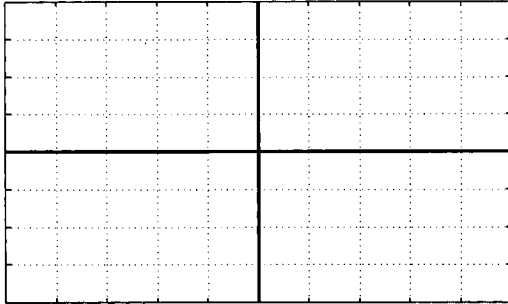
จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 5 บิตจำนวน 2 ชุดที่ตัวรับรับได้ โดยตัวรับจะแสดงค่าบิตผ่านแผงหลอดแอลอีดีจำนวน 10 หลอดบนอุปกรณ์ FPGA

ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) คือ

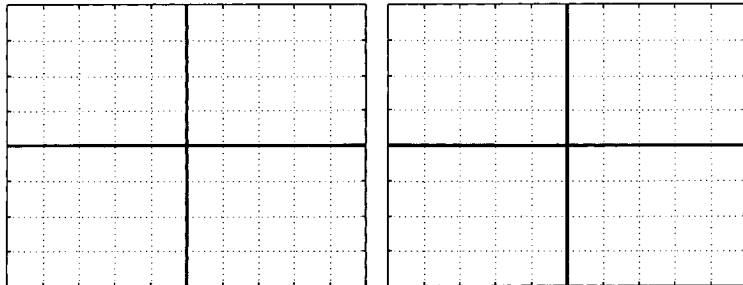
ค่าบิต 5 บิตจำนวน 2 ชุดที่ตัวรับรับได้คือ

หมายเหตุ: นศ. ควรลองส่งค่าบิตอื่น ๆ ดู และตรวจสอบว่าตัวรับรับบิตได้อย่างถูกต้อง

3. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วาดภาพสัญญาณที่ตัวรับได้ โดยตั้งค่าออสซิลโลสโคปที่ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div ให้คาบของสัญญาณน้อยอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด



4. วาดสัญญาณที่ถูกส่งออกจากผู้ใช้งานคนที่ 1 ในภาพซ้าย และออกจากผู้ใช้งานคนที่ 2 ในภาพขวา โดยตั้งค่าที่ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้คาบของบิตแรกจากแต่ละผู้ใช้งานอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด



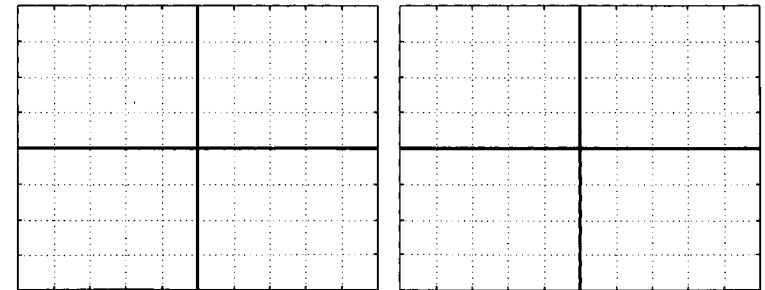
5. กำหนดวิธีการร่วมใช้ช่องสัญญาณให้เป็นแบบ FDMA จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 5 บิตจำนวน 2 ชุดที่ตัวรับได้

ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) 2 ค่าคือ และ

ค่าบิต 5 บิตจำนวน 2 ชุดที่ตัวรับได้คือ

หมายเหตุ: นศ. ควรลองส่งค่าบิตอื่น ๆ ดู และตรวจสอบว่าตัวรับบิตได้อย่างถูกต้อง

6. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วาดสัญญาณที่ถูกส่งออกจากผู้ใช้งานคนที่ 1 ในภาพซ้าย และออกจากผู้ใช้งานคนที่ 2 ในภาพขวา โดยตั้งค่าที่ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้คาบของบิตแรกจากแต่ละผู้ใช้งานอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด



หมายเหตุ: สัญญาณรวมของบิตข้อมูลทั้ง 2 ชุด ค่อนข้างจะซับซ้อน จึงไม่ได้ให้ นศ. วาด

กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 14

การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA

14.1 วัตถุประสงค์

1. สามารถเข้ารหัสและถอดรหัสค่าสัญญาณที่ใช้ในการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA
2. สามารถแสดงสัญญาณจากผู้ใช้งานหลายคน สำหรับการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA
3. สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับด้วยการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA

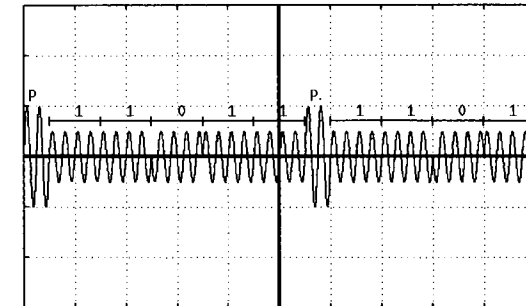
14.2 ความรู้พื้นฐาน

การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA (code division multiple access) เป็นการแบ่งการใช้สื่อโดยการเข้ารหัส (coding) รูปข้างล่างนี้แสดงให้เห็นถึงการรวมกันใช้สื่อสำหรับส่งข้อมูล 5 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จบจากตัวส่ง 2 ตัว โดยใช้รหัสที่มีความยาว 2 บิต สำหรับแต่ละบิตในรหัสนั้นถูกส่งแบบ BPSK สังเกตได้ว่าชุดของรหัสสำหรับแต่ละผู้ใช้งานนั้นแตกต่างกัน

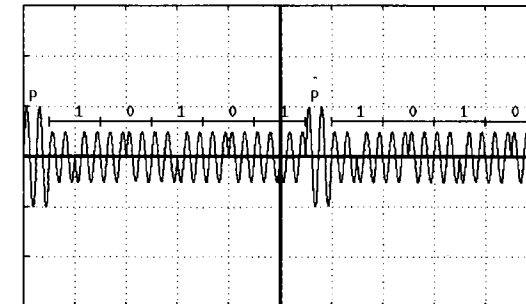
ตัวส่ง	บิตข้อมูล	รหัส (ความยาว 2 บิต)
1	0	00
	1	11
2	0	01
	1	10

นศ. ควรจะสังเกตว่า ในการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA นั้น สัญญาณจากตัวส่งทั้งสองตัวทับซ้อนกันในเชิงเวลา เนื่องจากสัญญาณจากตัวส่งทั้งสองยังใช้คลื่นพาหุที่มีความถี่เดียวกัน สัญญาณทั้งสองจึงทับซ้อนกันในเชิงความถี่อีกด้วย อย่างไรก็ตาม ตัวรับสามารถแยกสัญญาณของตัวส่งทั้งสองได้ด้วยการถอดรหัส สำหรับบิตข้อมูลที่ถูกส่งและอัตราบิตข้อมูลนั้น พิจารณาได้ดังนี้

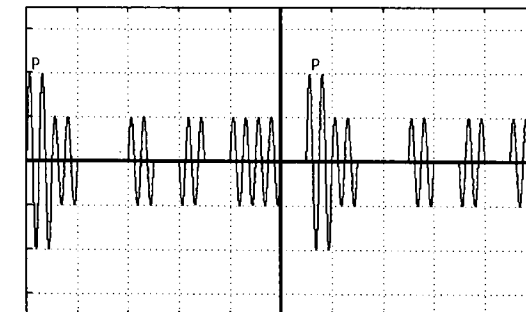
- จากรูป บิตข้อมูล 5 บิตที่ถูกส่งจากตัวส่งที่ 1 ได้แก่ 11011
- จากรูป บิตข้อมูล 5 บิตที่ถูกส่งจากตัวส่งที่ 2 ได้แก่ 10101
- อัตราบิตข้อมูลที่ถูกส่งสำหรับผู้ใช้งานแต่ละคนคือ $\frac{5 \text{ bit}}{21 \text{ ms}} \approx 0.238 \text{ kbps}$
- อัตราบิตข้อมูลที่ถูกส่งโดยรวมคือ $\approx 2 \times 0.238 = 0.476 \text{ kbps}$



สัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 1 (2 ms/Div และ 1 V/Div)



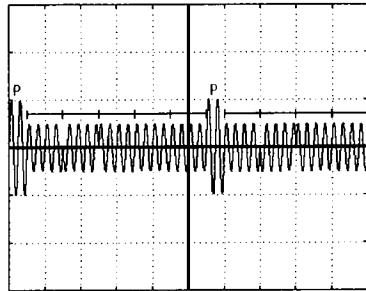
สัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 2 (2 ms/Div และ 1 V/Div)



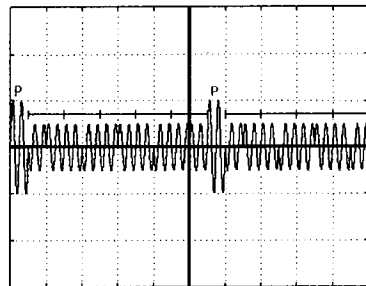
สัญญาณจากการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA (2 ms/Div และ 1 V/Div)
ซึ่งมาจากการบวกสัญญาณจากตัวส่ง 2 ตัวเข้าด้วยกัน

14.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง

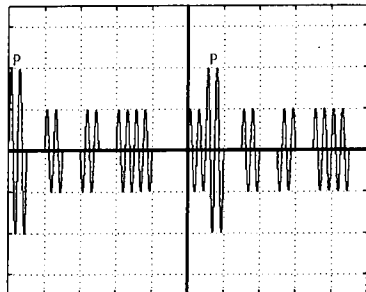
- พิจารณาถึงการส่งข้อมูลจากผู้ใช้งาน 2 คนโดยทำการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA ดังแสดงด้วยสัญญาณในรูปข้างล่างนี้ กำหนดให้สัญญาณจากผู้ใช้งานแต่ละคนเป็นแบบ BPSK โดยผู้ใช้งานแต่ละคนส่งบิตที่ได้จากการเข้ารหัสยาวทั้งสิ้น 10 บิต (มาจากข้อมูล 5 บิต) ในแต่ละกลุ่มบิตที่อยู่ระหว่างสัญญาณนำการเข้ารหัสบิตข้อมูลตรงตามรหัสในหัวข้อที่แล้ว



สัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 1 (1 ms/Div และ 0.5 V/Div)



สัญญาณจากผู้ใช้งานคนที่ 2 (1 ms/Div และ 0.5 V/Div)



สัญญาณ CDMA (1 ms/Div และ 0.5 V/Div)

จากรูป บิตข้อมูล 5 บิตที่ถูกส่งจากผู้ใช้งานคนที่ 1 ได้แก่

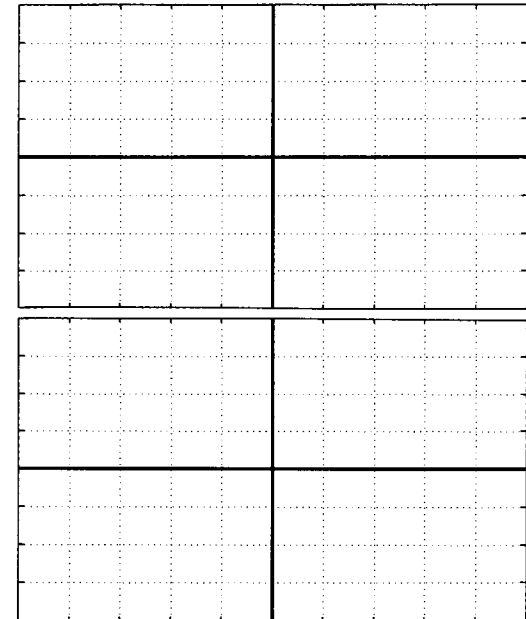
จากรูป บิตข้อมูล 5 บิตที่ถูกส่งจากผู้ใช้งานคนที่ 2 ได้แก่

ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) คือ

อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งสำหรับผู้ใช้งานแต่ละคนคือ

อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งโดยรวมคือ

- พิจารณาถึงการส่งข้อมูลจากผู้ใช้งาน 2 คนโดยทำการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA เหมือนในข้อที่ 1 แต่กำหนดให้บิตข้อมูลจากผู้ใช้งานคนที่ 1 เท่ากับ 00100 และบิตข้อมูลจากผู้ใช้งานคนที่ 2 เท่ากับ 10111 วาดภาพสัญญาณที่ถูกส่งจากผู้ใช้งานคนที่ 1 ในรูปบน และจากผู้ใช้งานคนที่ 2 ในรูปล่าง ใช้ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้สัญญาณน้อยที่สุดของรูป



14.4 การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับโดยการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบ CDMA

1. เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่งด้วยไฟล์ 114_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ 114_Rx.sof
2. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งส่งบิตข้อมูล 5 บิตซ้ำ ๆ กันจำนวน 2 ชุด (สมมติว่ามาจากผู้ใช้งาน 2 คน) แบบไม่รู้จบ โดยใช้สวิตช์แบบเลื่อน 5 ตัวแรก (SW9 ถึง SW5 บนอุปกรณ์ FPGA) ของตัวส่งกำหนดค่าบิตชุดที่ 1 ให้เท่ากับ 11011 และใช้สวิตช์แบบเลื่อน 5 ตัวหลัง (SW4 ถึง SW0 บนอุปกรณ์ FPGA) กำหนดค่าบิตชุดที่ 2 ให้เท่ากับ 10101 ส่วนวิธีการร่วมใช้ช่องสัญญาณถูกกำหนดให้เป็นแบบ CDMA โดยอัตโนมัติ

หมายเหตุ: การเลือกสัญญาณที่ถูกส่งจากตัวส่ง ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวส่ง โดยการกดสวิตช์ เป็นการสลับไปมาระหว่างสัญญาณต่อไปนี้

ชื่อสัญญาณบน FPGA	วิธีการร่วมใช้ช่องสัญญาณ	ตัวส่งสัญญาณ
c1	CDMA	ผู้ใช้งานคนที่ 1 เท่านั้น
c2	CDMA	ผู้ใช้งานคนที่ 2 เท่านั้น
c	CDMA	ผู้ใช้งานคนที่ 1 และ 2

หมายเหตุ: การเลือกดูสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงสัญญาณที่ตัวรับรับได้ กดหนึ่งครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 2 ทางเลือก

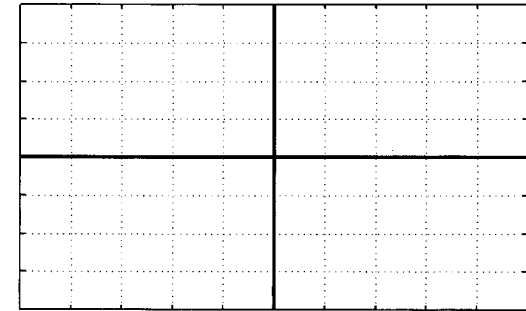
จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 5 บิตจำนวน 2 ชุดที่ตัวรับรับได้ โดยตัวรับจะแสดงค่าบิตผ่านแผงหลอดแอลอีดีจำนวน 10 หลอดบนอุปกรณ์ FPGA

ความถี่ของคลื่นพาที่ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) คือ

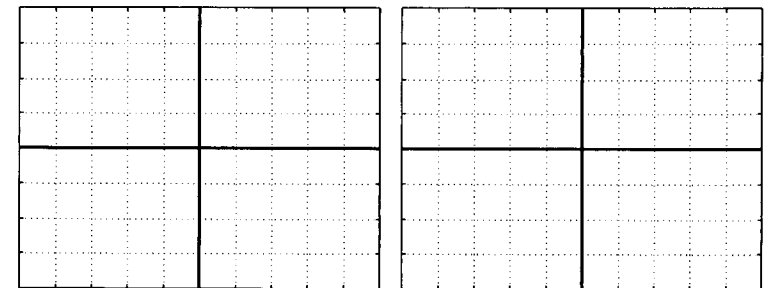
ค่าบิต 5 บิตจำนวน 2 ชุดที่ตัวรับรับได้คือ

หมายเหตุ: นศ. ควรลองส่งค่าบิตอื่น ๆ ดู และตรวจสอบว่าตัวรับรับบิตได้อย่างถูกต้อง

3. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วาดภาพสัญญาณที่ตัวรับรับได้ โดยตั้งค่าออสซิลโลสโคปที่ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div ให้คาบของสัญญาณนาอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด



4. วาดสัญญาณที่ถูกส่งออกจากผู้ใช้งานคนที่ 1 ในภาพซ้าย และออกจากผู้ใช้งานคนที่ 2 ในภาพขวา โดยตั้งค่าที่ 0.5 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้คาบของบิตแรกจากแต่ละผู้ใช้งานอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด



กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 15

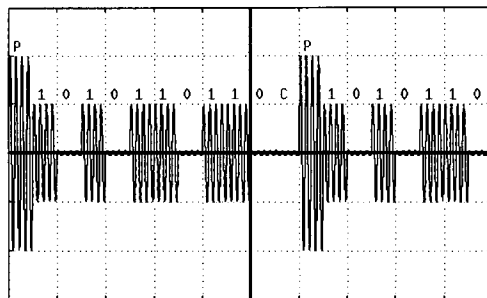
การเข้ารหัสตรวจสอบข้อผิดพลาด

15.1 วัตถุประสงค์

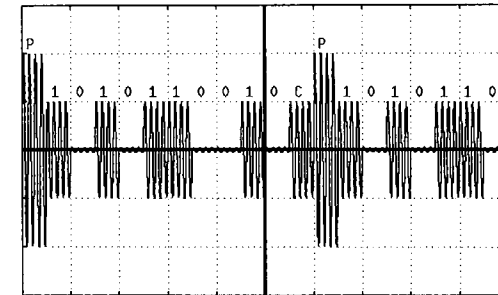
1. สามารถเข้ารหัสข้อมูลแบบ parity check ที่ตัวส่ง
2. สามารถตรวจจับข้อผิดพลาดจากบิตที่ได้รับ ตามรหัสแบบ parity check
3. สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับ โดยมีการเข้ารหัสตรวจจับข้อผิดพลาด

15.2 ความรู้พื้นฐาน

พิจารณาถึงการส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จบ โดยใช้สัญญาณแบบ ASK ดังแสดงในรูปข้างล่างสำหรับบิต 1010110110 และ 1010110010 ในแต่ละกรณี นอกเหนือจากบิตข้อมูล 10 บิต ตัวส่งได้เพิ่มบิตสุดท้ายซึ่งทำหน้าที่เป็นบิต *parity check* ที่ทำให้จำนวนบิต 1 (จากทั้งหมด $10 + 1 = 11$ บิต) เป็นจำนวนคู่เสมอ ทางฝั่งตัวรับ ถ้าได้รับบิตข้อมูล 10 บิตพร้อมกับบิต *parity check* ที่มีจำนวนบิต 1 เป็นเลขคี่ ก็จะทำให้การตรวจจับข้อผิดพลาด (*error detection*) ได้ ตัวรับก็จะไม่รับบิตข้อมูลมาพิจารณาต่อไป ในทางปฏิบัติ ตัวรับอาจจะขอให้ตัวส่งส่งข้อมูลเดิมซ้ำ (*retransmission*) เพื่อความถูกต้อง



2 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย C แทนบิต parity check



2 ms/Div และ 0.5 V/Div โดย C แทนบิต parity check

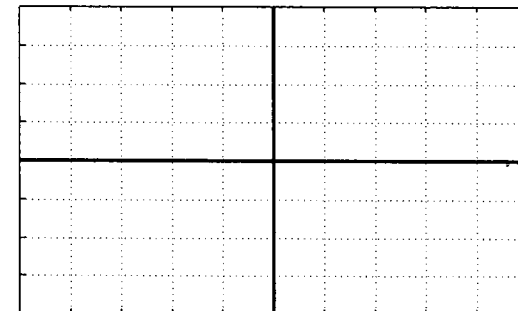
หมายเหตุ: ถึงแม้ว่าสัญญาณแบบ ASK จะถูกใช้ในการทดลองนี้ แต่เทคนิคการเข้ารหัสที่ใช้นั้นสามารถประยุกต์ใช้กับสัญญาณแบบอื่น ๆ อีกด้วย เช่น PSK และ QAM เหตุผลหลักที่สัญญาณ ASK ถูกนำมาใช้เนื่องจากเป็นสัญญาณที่มองเห็นค่าบิต 0 และ 1 ได้ง่าย สะดวกต่อการสังเกตค่าของบิตที่ได้จากการเข้ารหัส

15.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง

1. พิจารณาถึงการส่งข้อมูลโดยมีการเข้ารหัสตรวจสอบข้อผิดพลาดในรูปสุดท้ายของหัวข้อที่แล้ว

ในการส่งแบบมีทั้งสัญญาณนำและบิต *parity check* อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งคือ

2. วาดภาพสัญญาณที่ถูกส่งหลังการเข้ารหัส *parity check* โดยให้แต่ละกลุ่มบิตข้อมูลเท่ากับ 0100110110 ใช้สัญญาณแบบ ASK ดังในหัวข้อที่แล้ว ใช้คาบของการส่งสัญญาณแต่ละครั้งเท่ากับ 0.5 ms ใช้ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้สัญญาณนำอยู่ซ้ายสุดของรูป



3. เติมบิต parity check ในช่องว่างสำหรับค่าบิตข้อมูล 10 บิตในแต่ละกรณีข้างล่างนี้

1111100000 1100110011 1000100100

15.4 การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับโดยมีการเข้ารหัสตรวจจับข้อผิดพลาด

1. เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่งด้วยไฟล์ 115_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ 115_Rx.sof
2. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณ ASK สำหรับส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จัก โดยการส่งมีการเข้ารหัสด้วยบิต parity check ที่ทำให้รหัสมีจำนวนบิต 1 เป็นจำนวนคู่เสมอ

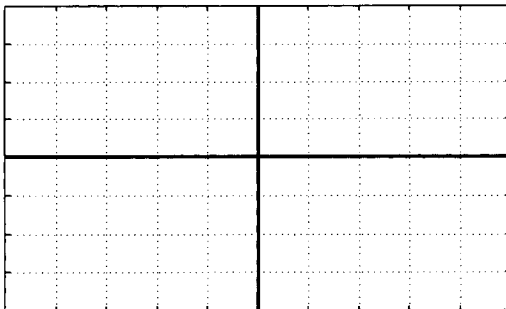
ใช้อุปกรณ์ตัวส่งส่งบิตข้อมูล 10 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จัก โดยใช้สวิตช์แบบเลื่อน 10 ตัว (SW9 ถึง SW0 บนอุปกรณ์ FPGA) ของตัวส่งกำหนดค่าบิต 1 ให้เท่ากับ 1010110110 จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับได้ โดยอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับจะแสดงค่าบิตผ่านแผงหลอดแอลอีดีจำนวน 10 หลอด

ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ใช้ (หน่วยเป็น Hz) คือ

ค่าบิต 10 บิตที่ตัวรับรับได้คือ

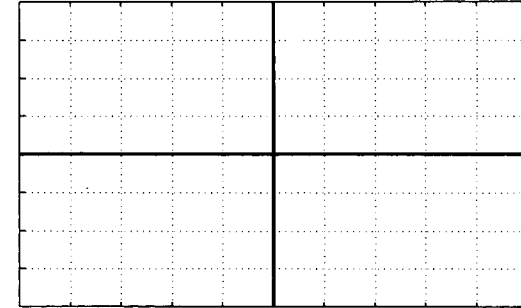
หมายเหตุ: นศ. ควรลองส่งค่าบิตอื่น ๆ ดู และตรวจสอบว่าตัวรับรับบิตได้อย่างถูกต้อง

3. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วาดภาพสัญญาณที่ตัวรับรับได้ โดยตั้งค่าออสซิลโลสโคปที่ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div ให้คาบของสัญญาณนำอยู่ทางซ้ายสุดของรูปที่วาด

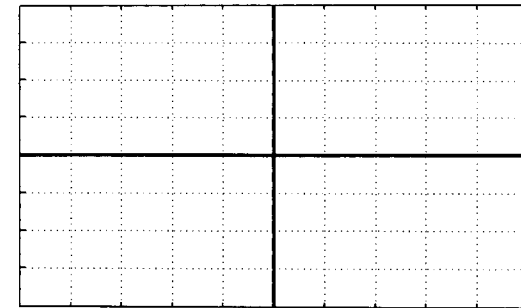


4. ทำข้อ 3 ซ้ำสำหรับสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของตัวรับ

หมายเหตุ: การเลือกดูสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงสัญญาณที่ตัวรับรับได้ กดหนึ่งครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 2 ทางเลือก



5. ทำข้อ 4 ซ้ำสำหรับสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของตัวรับ แต่เปลี่ยนค่าบิต 10 บิต เป็น 1011010010



กิจกรรมการเรียนรู้ที่ 16

การเข้ารหัสแก้ไขข้อผิดพลาด

16.1 วัตถุประสงค์

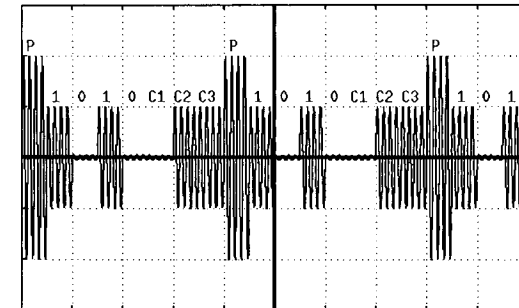
1. สามารถเข้ารหัสข้อมูลแบบ Hamming ที่ตัวส่ง
2. สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดจากบิตที่ได้รับ ตามรหัสแบบ Hamming
3. สามารถใช้ชุดทดลองส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับ โดยมีการเข้ารหัสแก้ไขข้อผิดพลาด

16.2 ความรู้พื้นฐาน

พิจารณาถึงการเข้ารหัสก่อนการส่งบิตข้อมูล ในกรณีการเติมบิต parity check จำนวนหลายบิต นอกเหนือจากการตรวจจับข้อผิดพลาด เรายังสามารถทำการแก้ไขข้อผิดพลาด (error correction) ได้อีกด้วย ตารางข้างล่างนี้แสดงรหัส Hamming ซึ่งนำบิตข้อมูลจำนวน 4 บิตมาเข้ารหัสโดยเติมบิต parity check จำนวน 3 บิตตามตารางข้างล่างนี้ (การเติมนั้นไม่ได้พิจารณาจำนวนบิต 1 เหมือนในกรณีก่อน แต่เป็นการเลือกบิตที่เติมตามทฤษฎีการเข้ารหัสทางคณิตศาสตร์)

บิตข้อมูล	บิตที่ได้จากการเข้ารหัส Hamming	บิตข้อมูล	บิตที่ได้จากการเข้ารหัส Hamming
0000	0000 <u>000</u>	1000	1000 <u>101</u>
0001	0001 <u>011</u>	1001	1001 <u>110</u>
0010	0010 <u>110</u>	1010	1010 <u>011</u>
0011	0011 <u>101</u>	1011	1011 <u>000</u>
0100	0100 <u>111</u>	1100	1100 <u>010</u>
0101	0101 <u>100</u>	1101	1101 <u>001</u>
0110	0110 <u>001</u>	1110	1110 <u>100</u>
0111	0111 <u>010</u>	1111	1111 <u>111</u>

รูปข้างล่างนี้แสดงการส่งบิตข้อมูล 1010 ซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จบ โดยใช้รหัส Hamming ในตาราง สังเกตว่าความยาวของรหัสคือ 7 บิต



2 ms/Div และ 1 V/Div โดย C1 C2 และ C3 แทนบิต parity check จำนวน 3 บิต

คุณสมบัติเด่นของรหัส Hamming ในตารางข้างบนคือรหัสแต่ละคู่จะมีจำนวนบิตที่แตกต่างกันอย่างน้อย 3 บิต เช่นรหัสสำหรับบิตข้อมูล 0001 และ 0010 (ซึ่งได้แก่ 0001011 และ 0010110) มีบิตที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 บิตในตำแหน่งที่ 3 4 5 และ 7

ถ้าตัวรับได้รับรหัสที่ไม่อยู่ในตาราง โดยมีบิตผิดพลาด 1 แห่ง ก็ยังสามารถถอดรหัสเพื่อรับบิตข้อมูลที่ถูกต้องได้ ยกตัวอย่างเช่น ตัวส่งส่งบิตข้อมูล 0001 โดยใช้รหัส 0001011 สมมุติว่าตัวรับได้รับบิต 1001011 ก็จะถอดรหัสได้บิตข้อมูล 0001 เนื่องจากรหัส 0001011 นั้นใกล้เคียงกับบิต 1001011 ที่ได้รับมากที่สุด

16.3 แบบฝึกหัดก่อนการทดลอง

1. พิจารณาถึงการส่งข้อมูลโดยมีการเข้ารหัสแก้ไขข้อผิดพลาดในรูปสุดท้ายของหัวข้อที่แล้ว

ในการส่งแบบมีทั้งสัญญาณนำและการเข้ารหัส Hamming อัตราบิตข้อมูล (หน่วยเป็น bps) ที่ถูกส่งคือ

2. เติมบิต parity check ตามรหัส Hamming ในช่องว่างสำหรับค่าบิตข้อมูล 4 บิตในแต่ละกรณีข้างล่างนี้

1111 1100 1001

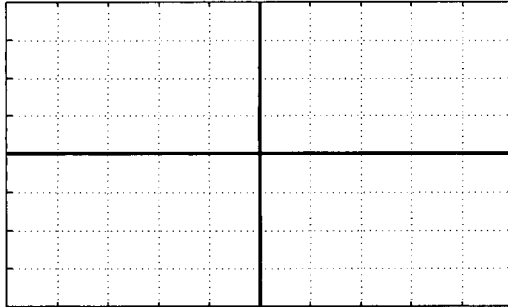
3. ถอดรหัสและเติมบิตข้อมูล 4 บิตในแต่ละกรณีของบิตที่ตัวรับได้รับข้างล่างนี้

บิตของรหัสที่ตัวรับได้รับ 0111010 $\Rightarrow$ บิตข้อมูลหลังถอดรหัส

บิตของรหัสที่ตัวรับได้รับ 1111011 $\Rightarrow$ บิตข้อมูลหลังถอดรหัส

บิตของรหัสที่ตัวรับได้รับ 0111001 $\Rightarrow$ บิตข้อมูลหลังถอดรหัส

4. วาดภาพสัญญาณที่ถูกส่งหลังการเข้ารหัส parity check โดยให้แต่ละกลุ่มบิตข้อมูลเท่ากับ 0101 ใช้สัญญาณแบบ ASK ดังในหัวข้อที่แล้ว ใช้คาบของการส่งสัญญาณแต่ละครั้งเท่ากับ 0.5 ms ใช้ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div และให้สัญญาณนำอยู่ซ้ายสุดของรูป



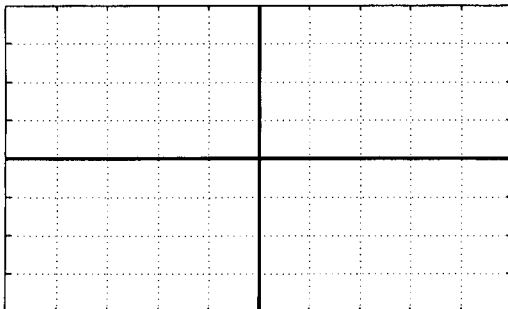
16.4 การส่งบิตข้อมูลจากตัวส่งไปยังตัวรับโดยมีการเข้ารหัสแก้ไขข้อผิดพลาด

1. เชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดลองเข้าด้วยกัน จากนั้นโปรแกรมกำหนดหน้าที่ของอุปกรณ์ FPGA ที่ตัวส่ง ด้วยไฟล์ l16_Tx.sof และที่ตัวรับด้วยไฟล์ l16_Rx.sof
2. ใช้อุปกรณ์ตัวส่งสร้างสัญญาณ ASK สำหรับส่งบิตข้อมูล 4 บิตซ้ำ ๆ กันแบบไม่รู้จบ โดยการส่งมีการเข้ารหัส Hamming ที่ใช้บิต parity check จำนวน 3 บิตสำหรับบิตข้อมูล 4 บิต ใช้สวิตช์แบบเลื่อน 4 ตัวแรก (SW9 ถึง SW6 บนอุปกรณ์ FPGA) กำหนดค่าบิต 4 บิตให้เท่ากับ 1010 จากนั้นต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับตัวรับ และสังเกตค่าบิต 4 บิตที่ตัวรับได้ โดยตัวรับจะแสดงค่าบิตผ่านแผงหลอดแอลอีดีจำนวน 4 หลอดแรก (LED9 ถึง LED6 บนอุปกรณ์ FPGA)

ค่าบิต 4 บิตที่ตัวรับได้คือ ☐ ☐ ☐ ☐

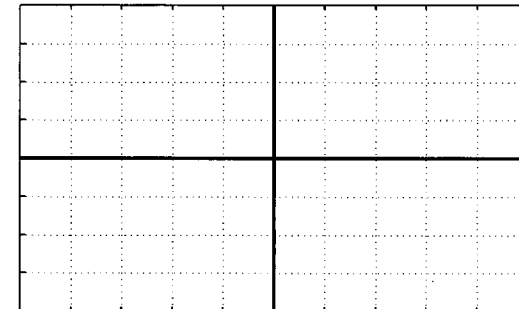
หมายเหตุ: นศ. ควรลองส่งค่าบิตอื่น ๆ ดู และตรวจสอบว่าตัวรับรับบิตได้อย่างถูกต้อง

3. จากภาพสัญญาณที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคป วาดภาพสัญญาณที่ตัวรับได้ โดยตั้งค่าออสซิลโลสโคปที่ 1 ms/Div และ 0.5 V/Div ให้คาบของสัญญาณน้อยที่สุดของรูปที่วาด

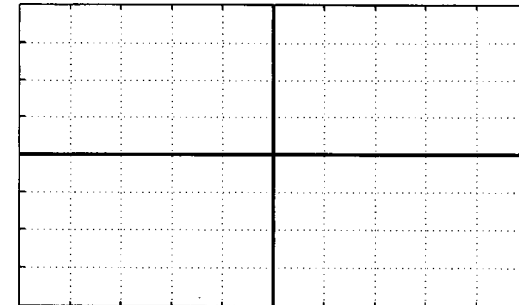


4. ทำข้อ 3 ซ้ำสำหรับสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของตัวรับ

หมายเหตุ: การเลือกดูสัญญาณที่ตัวรับ ทำได้โดยการกดสวิตช์แบบปุ่มกด BUTTON2 บนอุปกรณ์ FPGA ของตัวรับ โดยก่อนกดหมายถึงสัญญาณที่ตัวรับได้ กดหนึ่งครั้งหมายถึงสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ และการกดครั้งต่อ ๆ ไปเป็นการสลับไปมาระหว่าง 2 ทางเลือก



5. ทำข้อ 4 ซ้ำสำหรับสัญญาณที่ออกจากตัวกรองจับคู่ของตัวรับ แต่เปลี่ยนค่าบิต 4 บิต เป็น 1011



Software Defined Communication Labs Using the Audio Interface of Laptop Computers

Poompat Saengudomlert and Pakorn Ubolkosold
Bangkok University - Center of Research in Optoelectronics,
Communications, and Control Systems (BU-CROCCS)
Bangkok University, Thailand

Abstract

This paper presents an initial phase of an on-going sponsored project whose goal is to develop low-cost lab sessions that can be used to complement theoretical lectures on digital communications in the undergraduate level. In particular, On-Off Keying (OOK), Binary Phase Shift Keying (BPSK), and Quaternary Phase Shift Keying (QPSK) transmissions are demonstrated using the wireless audio channel between a speaker and a microphone that are built in typical laptop computers. Students can observe the transmitted waveforms, received waveforms with actual noise from the audio channel, and other waveforms in the detection process, e.g., matched filter output. The platform is developed using the Octave software on the Ubuntu operating system, both of which are available for free.

Keywords: Digital communications, software defined radio, laboratory experiments, hands-on experience

1 Introduction

This project aims to develop low-cost lab sessions that can be used to complement theoretical lectures on digital communications in the undergraduate level [1, 2]. It is an initial phase of an on-going attempt at BU-CROCCS (Bangkok University-Center of Research in Optoelectronics, Communications, and Control Systems) to develop low-cost software defined communication labs that can be used in developing countries such as Thailand.

Besides academic curiosity, the project is motivated by the fact that several universities in developing countries do not have enough lab equipments to support students. This is because commercial lab setups are often costly due to the use of industrial grade equipments, which may not be necessary for learning the basics. As a result, several students only study digital communications abstractly through theoretical discussions based on mathematics, without having any hands-on experience on data transmissions. Although there have been many proposed lab settings, most of them rely on either the industrial grade equipments and/or license software [3, 4, 5].

While software defined communication labs will not resemble practical telecom systems, they will be created based on the same working principles. The main distinction lies in the name; less signal processing is done in hardware for software defined communications. Nevertheless, the same signal processing is carried out. In addition, through the use of a digital-to-analog converter (DAC), students can observe physical waveforms at various steps of signal processing.

In the first phase, we explore the use of built-in audio interfaces of typical laptop computers to conduct a few simple experiments on digital communications. The involved softwares are free. Therefore, the labs can be run without any cost in addition to having two laptop computers.¹ In particular, it is possible to use the Ubuntu 12.04 LTS operating system and the Octave 3.2.4 computing software. However, without significant efforts, developed programs can be adjusted to run on Windows (instead of Ubuntu) and MATLAB (instead of Octave). Note that the developed platform is available for free and can be requested by sending an email to poompat.s@bu.ac.th with the name, organization, and position of the requester mentioned.

This paper is organized as follows: Section 2 describes the implementation approach of the proposed lab sessions. Section 3 presents the four lab sessions in detail. Section 4 summarizes the current achievement of the project and highlights the future plans. Note that all the figures in this papers are obtained from screenshots observed by students running the experiments.

2 Implementation Approach

The developed lab sessions utilize the audio interfaces of laptop computers. The speaker of a laptop functions as a digital-to-analog converter (DAC) of a transmitter, while the microphone functions as an analog-to-digital converter (ADC) of a receiver. The audio frequency spectrum of the open air serves as the transmission medium. Hence, the audible frequency range is required for the carrier signal frequency; val-

¹Actually, the labs can be run on one laptop computer since it can both send and receive signals. However, having two computers can better illustrate data transmissions since one can be the sender of data while the other can be the receiver of data.

ues in the range 500–1000 Hz are recommended. The sampling frequency of 8 kHz is used. Data rates are kept in the order of 10–100 bps for clarity of various signal presentations. Fig. 1 illustrates the overall structure of relevant components used in the labs.

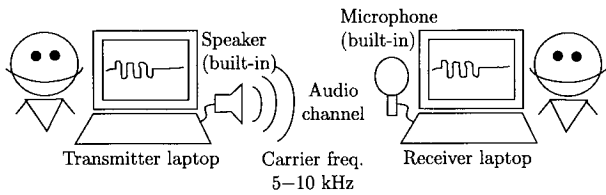


Fig. 1: Overall setup of the developed system

3 Developed Lab Sessions

Lab 1: Signals in time and frequency domains

In this first lab session, sinusoidal carrier waveforms in the audible range are transmitted. Students can observe the transmitted and received waveforms both in time and in frequency. Table 1 lists the system parameters used in this lab.

Table 1: System parameters for lab 1

Parameter	Notation	Value
Carrier freq.	f_c	500, 800 Hz
TX duration	T_{Tx}	2 s
RX duration	T_{Rx}	4 s
Sampling freq.	f_s	8000 Hz

Fig. 2 illustrates the transmitted signal in time and frequency for the carrier signal at 500 Hz. Fig. 3 shows similar information for the received signal. Note that, while the time-domain signal looks distorted, the frequency component at the carrier frequency is still dominant.

Lab 2: Transmissions using OOK

In this lab session, the simple OOK modulation is used to transmit data at 10 bps.² Table 2 lists the system parameters used in this lab.

Table 2: System parameters for lab 2

Parameter	Notation	Value
Carrier freq.	f_c	500 Hz
TX duration	T_{Tx}	2 s
RX duration	T_{Rx}	4 s
Sampling freq.	f_s	8 kHz
Modulation	–	OOK
Symbol period	T	0.1 s
No. TX symbols	K	10
Timing preamble	–	1, 1, –1, –1, 1, 1, –1, –1, 1, 1
LPF bandwidth	W	$3/T$

For OOK, we assume that each data bit is mapped into signal value 0 or 1. To distinguish from data bits, the preamble for timing recovery contains signal values –1 and 1.

²Note that the bit rate can be increased to 1 kbps if an audio cable is used to connect the transmitter to the receiver.

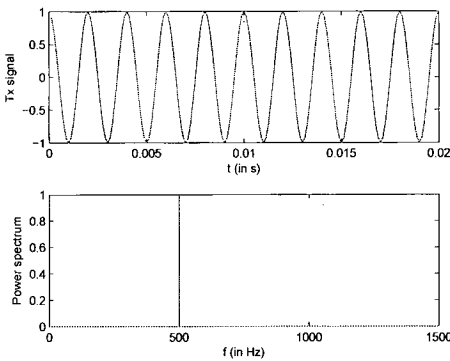


Fig. 2: Transmitted signal in time/frequency for lab 1

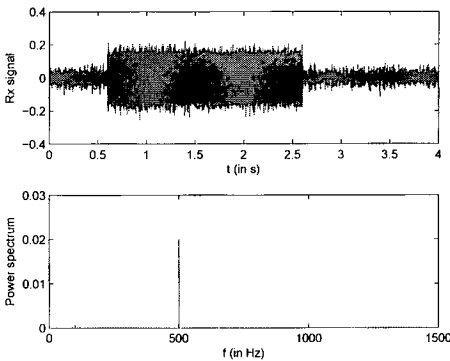


Fig. 3: Received signal in time/frequency for lab 1

Fig. 4 illustrates the baseband and passband transmitted signals in time, and the transmitted passband signal in frequency. Fig. 5 shows the received passband and baseband signal, and the synchronized data signal together with matched filter output. In addition, in the plot of the matched filter output, circle markers are used to indicate the sampling times used to obtain signal values for threshold-based detection, where the threshold is set equal to the mean signal value. Note that, in the figure, the transmitted data bits are 0001101001.

Lab 3: Transmissions using BPSK

In this lab session, the BPSK modulation is used to transmit data at 10 bps. Table 3 lists the system parameters used in this lab.

Table 3: System parameters for lab 3

Parameter	Notation	Value
Carrier freq.	f_c	500 Hz
TX duration	T_{Tx}	2 s
RX duration	T_{Rx}	4 s
Sampling freq.	f_s	8 kHz
Modulation	–	BPSK
Symbol period	T	0.1 s
No. TX symbols	K	10
Timing preamble	–	1, –1, 1, –1, 1, –1, 1, –1, 1, –1
LPF bandwidth	W	$3/T$

For BPSK, we assume that each data bit is mapped

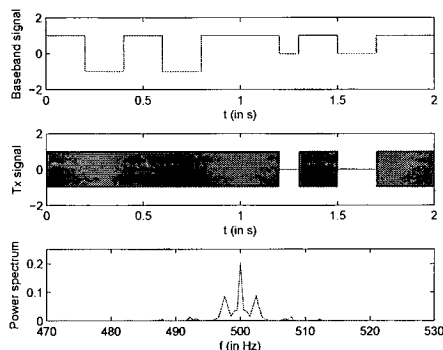


Fig. 4: Baseband/passband transmitted signals in time, and passband transmitted signal in frequency for lab 2

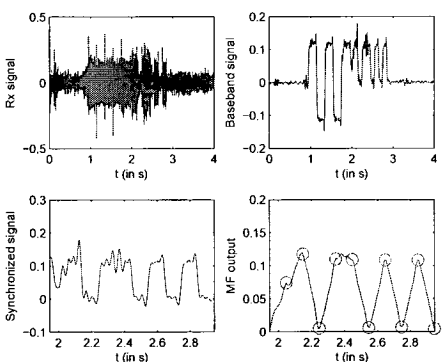


Fig. 5: Passband/baseband received signals, synchronized data signal, and matched filter output for lab 2

into signal value -1 or 1 . Consequently, we design the preamble to be mapped into a sequence of pulses such that each positive pulse period is $3/2$ times the data symbol period while each negative pulse period is $1/2$ times the data symbol period. This is to avoid having the preamble-like signal appearing within the data carrying signal.

Fig. 6 illustrates the baseband and passband transmitted signals in time, and the transmitted passband signal in frequency. It should be observed that, unlike OOK, the BPSK passband signal does not contain silence gaps. Fig. 7 shows the received passband and baseband signal, and the synchronized data signal together with matched filter output. In addition, in the plot of the matched filter output, circle markers are used to indicate the sampling times used to obtain signal values for threshold-based detection, where the threshold is set to 0. Note that, in the figure, the transmitted data bits are 1001010001.

Lab 4: Transmissions using QPSK

In this lab session, the QPSK modulation is used to transmit data at 20 bps. Table 4 lists the system parameters used in this lab.

For QPSK, we assume that each pair of data bits are mapped into a QPSK symbol as: $11 \leftrightarrow 1 + i$, $01 \leftrightarrow -1 + i$, $00 \leftrightarrow -1 - i$, $10 \leftrightarrow 1 - i$. We keep the preamble to be the same as for BPSK, i.e., no imaginary parts in the preamble.

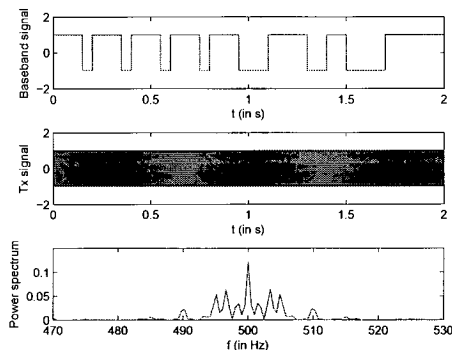


Fig. 6: Baseband/passband transmitted signals in time, and passband transmitted signal in frequency for lab 3

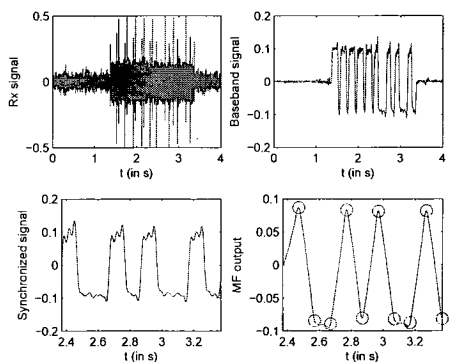


Fig. 7: Passband/baseband received signals, synchronized data signal, and matched filter output for lab 3

Fig. 8 illustrates the baseband and passband transmitted signals in time, and the transmitted passband signal in frequency. It should be observed that, compared to BPSK, the magnitude of the data carrying signal is bigger since there are two data streams instead of one. Fig. 9 shows the received passband as well as baseband signals for the real and imaginary parts of QPSK. Fig. 10 shows the synchronized data signals together with matched filter outputs for both real and imaginary parts of QPSK symbols. Fig. 11 shows the constellation diagram for 100 transmitted QPSK symbols. Note that, in Fig. 9 and Fig. 10, the transmitted QPSK symbols are $1 - i$, $1 + i$, $-1 + i$, $-1 - i$, $1 - i$, $1 + i$, $-1 + i$, $-1 - i$, $1 + i$, and $1 - i$.

4 Conclusion and Future Work

In this paper, the current status of the low-cost digital communications labs are reported. The four lab sessions including basic signal representation in time and frequency domains as well as OOK, BPSK and QPSK transmissions are described.

In the future, we plan to add Frequency Division Multiple Access (FDMA) and Code Division Multiple Access (CDMA) and transmission using Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) modulation in the project.

In the long term, we plan to implement the trans-

Table 4: System parameters for lab 4

Parameter	Notation	Value
Carrier freq.	f_c	500 Hz
TX duration	T_{Tx}	2 s
RX duration	T_{Rx}	4 s
Sampling freq.	f_s	8 kHz
Modulation	—	QPSK
Symbol period	T	0.1 s
No. TX symbols	K	10
Timing preamble	—	1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1
LPF bandwidth	W	$3/T$

missions systems using field programmable gate arrays (FPGAs) together with digital-to-analog (D/A) and analog-to-digital (A/D) circuits. This will allow continuous transmissions of data instead of finite-duration transmissions as assumed in this first phase.

References

[1] S. Haykins, and M. Moher, *Communication Systems*, 5th Edition, Wiley, 2009.

[2] J.G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th Edition, McGraw-Hill, 2008.

[3] J.G. Proakis, M. Salehi, and G. Bauch, *Contemporary Communication Systems Using MATLAB and Simulink*, 2nd Edition, Brooks/Cole, 2004.

[4] P. Kinman, and D. Murdock, "Communications laboratory with commercial test and training instrument," in *Proceeding of PSW American Society for Engineering Education (ASEE) 2011*, 2011.

[5] A.M. Wyglinski, D. Pu, and D. J. Cullen, "Digital communication systems education via software-defined radio experimentation," in *Proceeding of PSW American Society for Engineering Education (ASEE) 2011*, 2011.

Poompat Saengudomlert received the King Scholarship from Thailand to obtain his B.S.E. degree in Electrical Engineering from Princeton University, USA, in 1996. He then obtained his M.S. and Ph.D. degrees, both in Electrical Engineering and Computer Science, from MIT, USA, in 1998 and 2002 respectively. Currently, he is an associate professor at Bangkok University-Center of Research in Optoelectronics, Communication, and Control Systems (BU-CROCCS), Thailand. His research interest includes communication theory, optical communications, and software defined radio.

Pakorn Ubolkosold received his B.Eng. degree in Electrical Engineering in 2000 from Sirindhorn International Institute of Technology (SIIT), Thailand. In 2003 he received the M.Sc. degree in Communications Technology from Ulm University and the Dr.-Eng. degree in Electrical Engineering in 2009 from Siegen University, Germany. From 2008 to 2011, he joined technical staff at Ericsson, Germany. In 2011, he joined School of Engineering, Bangkok University, Thailand. His research interests include parameters estimation, Kalman filters, image processing, and navigation systems.

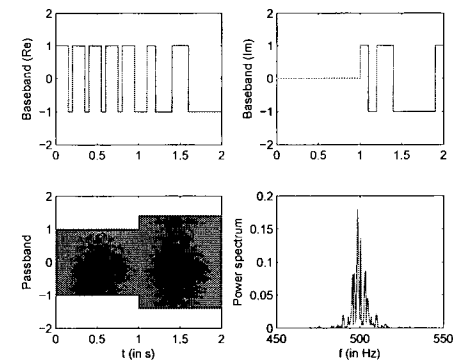


Fig. 8: Baseband/passband transmitted signals in time, and passband transmitted signal in frequency for lab 4

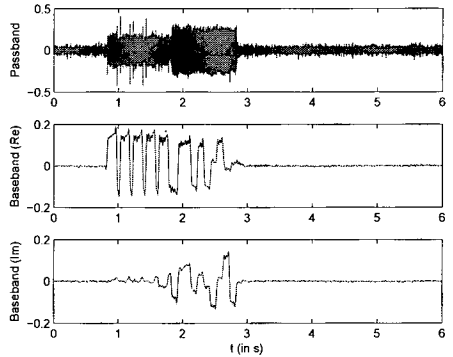


Fig. 9: Passband/baseband received signals for lab 4

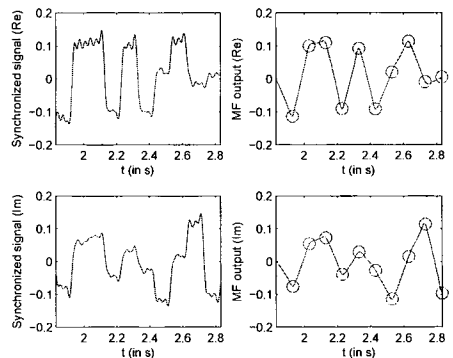


Fig. 10: Synchronized data signals, and matched filter outputs for lab 4

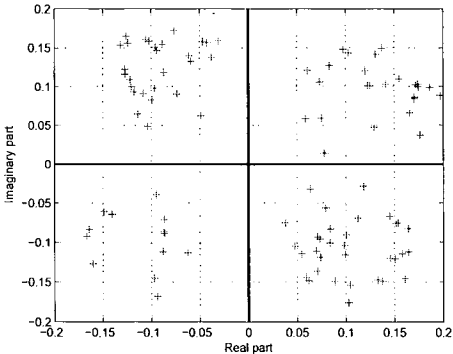


Fig. 11: Received QPSK constellation diagram for lab 4 (with 100 transmitted symbols)

Development of Software Defined Communication Systems for Improving Technical Education in Thailand

Poompat Saengudomlert, Natthaphob Nimpitiwan, and Pakorn Ubolkosold

Bangkok University-Center of Research in Optoelectronics,
Communications, and Control Systems (BU-CROCCS)

9/1 Moo 5, Paholyothin Road, Klong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

E-mail : poompat.s@bu.ac.th, natthaphob.n@bu.ac.th, pakorn.u@bu.ac.th

Abstract: Due to high prices of imported laboratory equipment for teaching and learning digital communications, several educational institutes in Thailand (as well as some neighboring countries) are facing problems of equipment shortage. A lot of students end up learning from textbooks without actual experiments, causing them to lack confidence in their knowledge. Fortunately, reprogrammable digital electronics, in particular field programmable gate arrays (FPGAs), are becoming cheaper with higher computational powers. Universities can now use them to develop communication systems for laboratory equipment. This article describes such activities at Bangkok University-Center of Research in Optoelectronics, Communications, and Control Systems (BU-CROCCS), Thailand.

Keywords— digital communications, laboratory, software defined, field programmable gate array, digital-to-analog converter, analog-to-digital converter

1. Introduction

The lack of equipment for teaching and learning of digital communications, considered as an important technical subject in the age of digital information, has been a weakness in several educational institutes in Thailand (as well as some neighboring countries). While such equipment may be imported, their high price tags would allow at most 2–3 sets of equipment to be shared by 20–30 students in a typical classroom. Without sufficient hands-on experiences, a lot of students lack confidence in their knowledge obtained from textbook-based learning and from simulation software.

Recently, several universities around the world have developed their own digital communication laboratories using the software defined approach [1], [2], [3]. In this approach, a common set of hardware can be used for different experiments, with its functionalities changed through software, i.e., hardware programming. Consequently, the software defined approach can provide laboratory equipment with modest costs.

One key hardware component in software defined communication systems is a field programmable gate array (FPGA), which is a digital electronic device that can be used to perform digital signal processing (DSP). An FPGA is, in principle, configured by a hardware description language, e.g., Verilog [4]. However, several commercial software packages, e.g., MATLAB, allow users to program the hardware indirectly with a more user-friendly syntax or graphical user interface (GUI) [5].

This article describes activities at Bangkok University-Center of Research in Optoelectronics, Communications, and

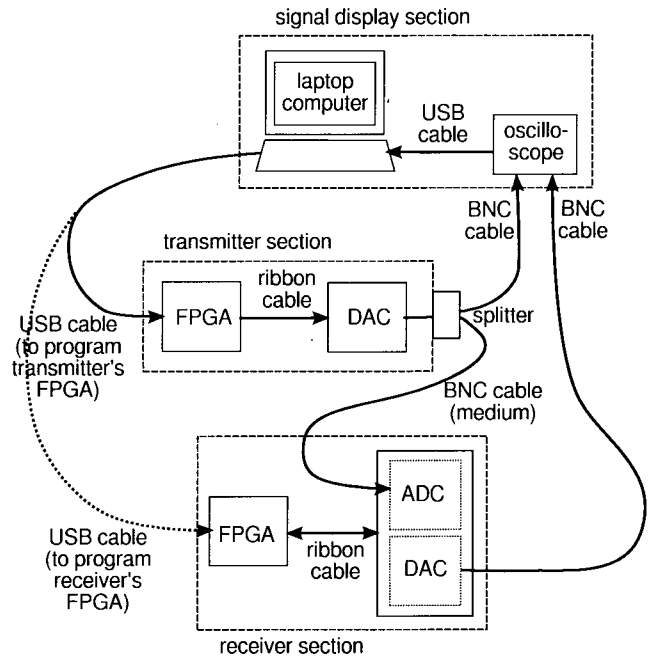


Figure 1. Structure of the developed software defined communication system

Control Systems (BU-CROCCS) towards developing software defined communication systems to be used as laboratory kits in educational institutes in Thailand, and possibly in neighboring countries later on. Section 2 presents the overall system structure, main hardware components, and key transmission system parameters. Section 3 shows example data signals that can be generated from the developed system. Section 4 discusses actual uses of the developed laboratory kits. Finally, section 5 provides a summary as well as directions for future development.

2. System Components and Parameters

The developed software defined communication system has the structure as shown in Fig. 1. In particular, since FPGAs are digital devices and analog signals are needed for data transmissions over the transmission line (coaxial cable in this case), we developed in BU-CROCCS a digital-to-analog converter (DAC) to be used by the transmitter. In addition, we developed an analog-to-digital converter (ADC) to be used by the receiver.

The transmitted signal is split such that one copy goes to the receiver while the other is fed to an oscilloscope for signal display. Another DAC is used by the receiver to send the

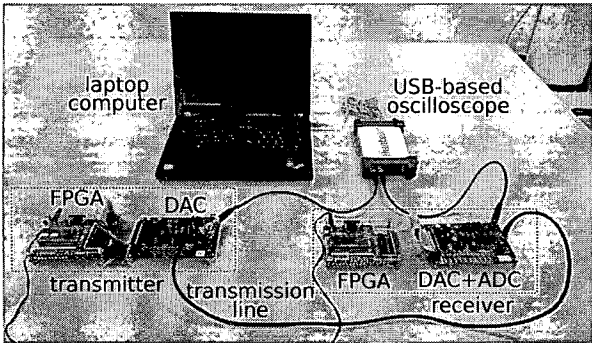


Figure 2. Actual software defined communication system developed in BU-CROCCS

Table 1. Communication system parameters

Parameter	Value
Bit rate	1–10 kbps
Carrier frequency	1–5 kHz
No. quantization bits	10 bit/sample
Sampling rate	100 kHz
Pulse shape	rectangular
Modulation format	PAM, PWM, PPM ASK, FSK, PSK, QPSK

received signal or a processed signal to the same oscilloscope for comparison with the transmitted signal.

Fig. 2 shows the actual hardware used to implement the system in Fig. 1. Table 1 lists key system parameters of the developed communication system. Note that the supported modulation formats include pulse amplitude modulation (PAM), pulse width modulation (PWM), pulse position modulation (PPM), amplitude shift keying (ASK), frequency shift keying (FSK), phase shift keying (PSK), and quadrature PSK (QPSK).

DE0 Development and Education boards, which contain Altera’s Cyclone III FPGAs, are used in the development [6]. Hardware programs for the FPGAs are written in Verilog, and compiled using Quartus II Web Edition v12.1, which is available for free [7].

3. Example Data Signals

Fig. 3, 4, and 5 show example data signals for binary PAM, ASK, and FSK modulations, respectively. In each figure, the top graph (in yellow) is the transmitted signal while the bottom graph (in green) is the received signal. In addition, the oscilloscope is set at 0.5 V/Div for the signal value (vertical axis), and at 2 ms/Div for time (horizontal axis).

The system is set to transmit data bits in groups of 10, with preamble signals between consecutive groups. The preamble part has a higher amplitude than the data part. This higher amplitude serves two purposes. First, students can easily see from the oscilloscope display the beginning of each data frame (consisting of 10 bits). Second, the receiver can use it for timing synchronization so that data bits can be detected and displayed through LED lamps on the receiver’s FPGA.

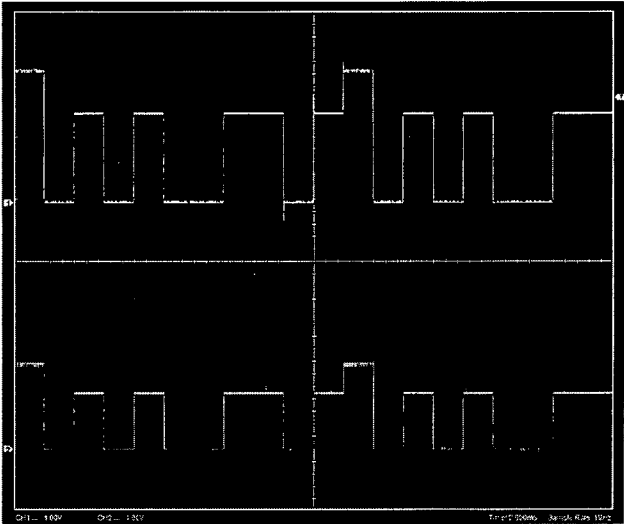


Figure 3. Transmitted and received PAM signals

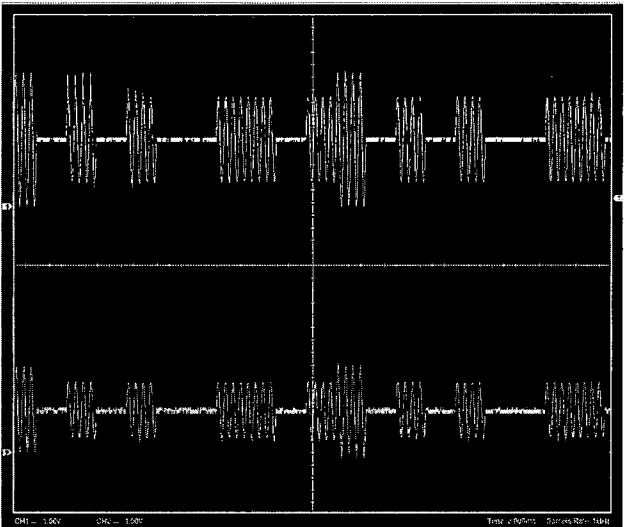


Figure 4. Transmitted and received ASK signals

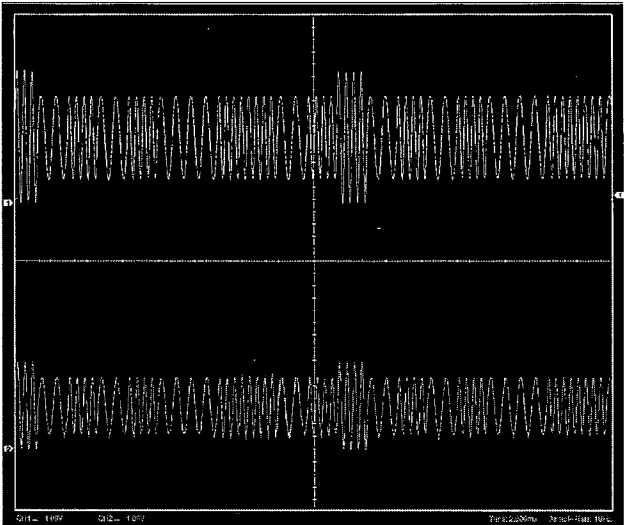


Figure 5. Transmitted and received FSK signals

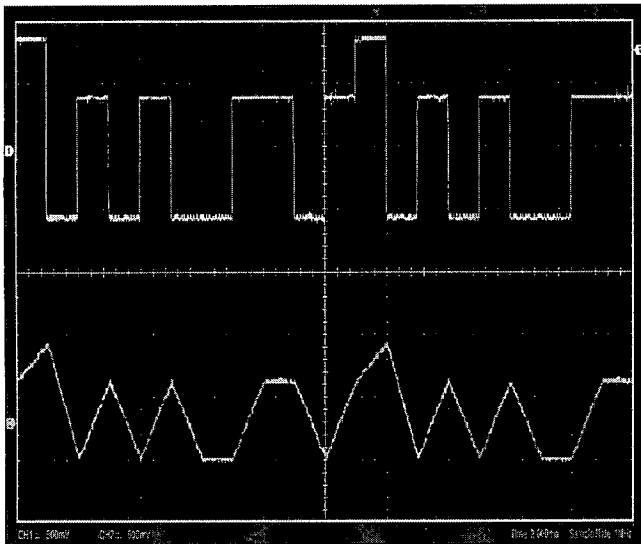


Figure 6. Transmitted PAM signal and matched filter output at the receiver

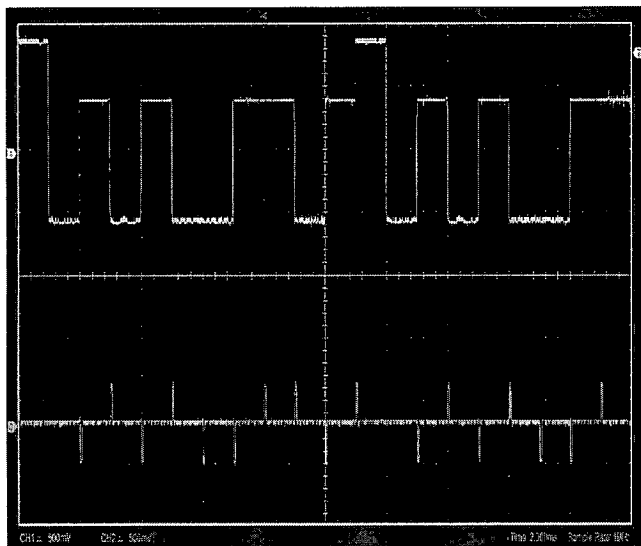


Figure 7. Transmitted PAM signal and samples taken from matched filter output at the receiver

In Fig. 3, 4, and 5, the transmitted group of 10 bits are 0101001101. It can be seen from Fig. 3 that, in binary PAM, bit 1 is mapped to a rectangular pulse with a positive value, while bit 0 is mapped to a negative value. For binary ASK in Fig. 4, bit 1 is mapped to a carrier signal (sinusoidal) with a high amplitude, while bit 0 is mapped to a low amplitude. Finally, for binary FSK in Fig. 5, bit 1 is mapped to a carrier signal with a high frequency, while bit 0 is mapped to a low frequency.

Students can themselves select the 10 bits in each frame through setting the 10 slide switches on the transmitter's FPGA. This feature of the developed system allows for interactive learning experiences in which students can change the data bits and observe changes in the transmitted data signal instantaneously.

In addition to observing the transmitted and received sig-



Figure 8. Deliveries of laboratory kits to two instructors in two vocational schools in Thailand

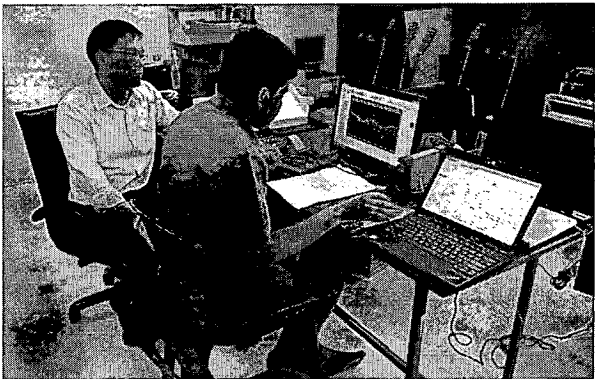


Figure 9. On-site training to one instructor prior to actual teaching using laboratory kits

nals, as shown in Fig. 3, 4, and 5, students can observed various steps of signal processing at the receiver. For example, Fig. 6 shows the output from the matched filter at the receiver (in green) with respect to the transmitted signal (in yellow). Fig. 7 shows the signal samples taken from the matched filter output at the receiver (in green). Note that these samples are used for detection of data bits. For each sample, if the value is above the threshold value for detection (shown as the mean value in Fig. 7), the corresponding detected bit is 1. Otherwise, the detected bit is 0. In Fig. 7, we can see that the detected bits in each frame are 0101001101.

4. Actual Uses of the Developed System

The developed system was used on a trial basis by instructors at two vocational schools in Thailand. Fig. 8 shows laboratory equipment deliveries to the two vocational schools. The equipment were arranged as laboratory kits each of which can be contained in a backpack for ease of transport.

On-site trainings were provided to the instructors before they applied laboratory kits in teaching the fundamentals of digital communications, as shown in Fig. 9. Fig. 10 shows classroom environments during actual uses of laboratory kits during the first half of 2015. Students worked in groups to perform various experiments.

Based on the feedback from the two instructors (Ekkaphot Keawklai and Samanathorn Poompimol), students enjoyed using the laboratory kits in performing various experiments. In addition, the laboratory kits helped maintain student interest in the subject, which can be quite abstract without actual

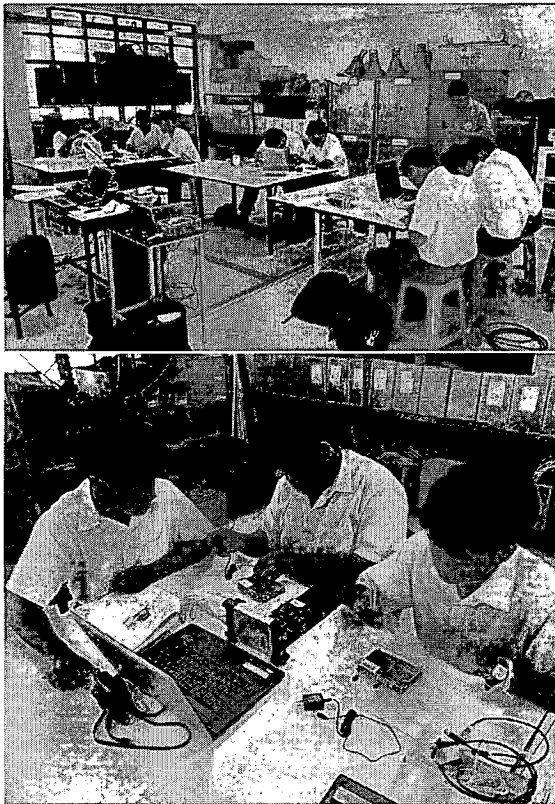


Figure 10. Classroom environments during actual uses of laboratory kits

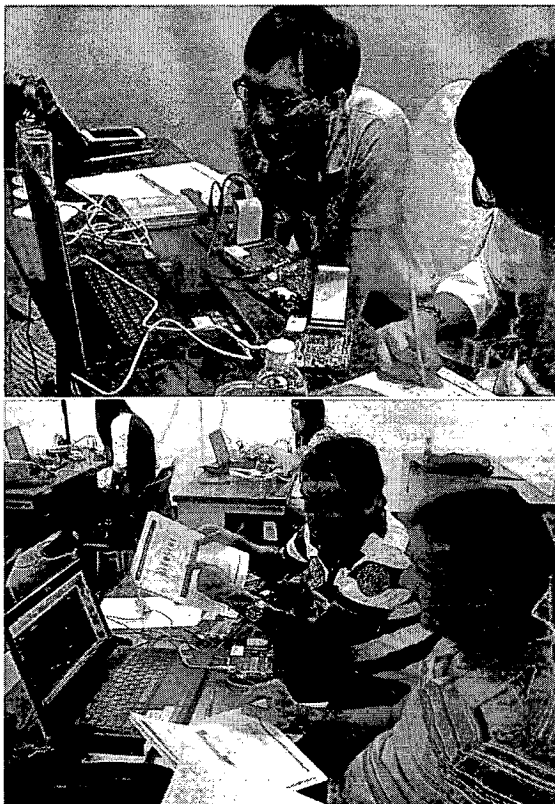


Figure 11. Participants of seminars on software defined laboratory kits for teaching and learning the fundamentals of digital communications

experiments. Finally, the laboratory kits were easy to use, and could demonstrate several concepts as effectively as imported laboratory equipment.

After the actual uses in two vocational schools, BU-CROCCS organized hands-on seminars in several occasions in order to gain further experiences in using the developed laboratory kits. The audience in these seminars include both Thai and international students, as shown in Fig. 11. Based on the feedback obtained from these seminars, participants found the laboratory kits easy to use. Several expressed their satisfaction in eventually “seeing” what they have learned from textbooks, and encouraged the use of these laboratory kits in actual teaching.

5. Conclusion

We developed software defined communication systems to be used as laboratory kits for teaching and learning the fundamentals of digital communications. The software defined approach helps keep the development cost low since the same set of hardware can be used for different experiments through hardware programming. In our development, we purchased FPGAs from Altera to perform DSP and constructed DACs together with ADCs. While the data rates are modest, the systems are based on the same fundamentals as high-rate systems, and can be used to alleviate the lack of laboratory equipment in Thailand as well as in some neighboring countries.

Future activities include the development of other types of transmission medium, including the use of wireless antennas and optical fibers. In addition, various kinds of signal distortion, e.g., noise and dispersion, can be demonstrated by the laboratory kits. Finally, activities that allow students to modify hardware programs for DSP will be considered.

Acknowledgement

The authors would like to thank Thailand Research Fund (TRF) for sponsoring this development project under the contract number RDG5740028.

References

- [1] D.G. Michelson, D.W. Matolak, and W. Tong (Ed.), “Communications education and training: Software defined radio,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 182–209, May 2014.
- [2] J. Mitola et al. (Ed.), “Software defined radio – 20 years later: Part 1,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 22–71, September 2015.
- [3] H. Hu et al. (Ed.), “Software defined radio – 20 years later: Part 2,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 1, pp. 10–57, January 2016.
- [4] S. Brown and Z. Vranesic, *Fundamentals of Digital Logic with Verilog Design, 3rd Edition*, McGraw-Hill, 2013.
- [5] MathWorks, “FPGA Design and SoC Codesign,” available at www.mathworks.com/solutions/fpga-design/
- [6] Terasic, “Altera DE0 board,” available at www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&No=364
- [7] Altera, “Quartus II Web Edition v12.1,” available at <https://wl.altera.com/download/software/quartus-ii-we/12.1>

Interactive Browser-Based Digital Communications Laboratory

Pakorn Ubolkosold, Poompat Saengudomlert, and Natthaphob Nimpitiwan

Bangkok University-Center of Research in Optoelectronics,
Communications, and Control Systems (BU-CROCCS)

9/1 Moo 5, Paholyothin Road, Klong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

E-mail : pakorn.u@bu.ac.th, poompat.s@bu.ac.th, natthaphob.n@bu.ac.th

Abstract: Being able to interact with and visualize the concept of digital communications through different forms of hands-on experiments is a crucial learning process for electrical/electronic engineering students to gain a better understanding of the subject. This paper presents a user-friendly browser-based digital communications training platform that allows students to interactively perform experiments covering topics like basic types of signals, lowpass filtering, matched filtering, baseband/passband modulations, signal multiplexing, and channel coding. Signals along the communication chain, i.e., at various points from the transmitter to the receiver, can be displayed and visualized on any standard web browser. Having a browser-based nature, the developed training platform allows for both offline and online uses. Consequently, it can be set to operate as a standalone, intranet-based, or Internet-based application.

Keywords— digital communications, signal processing, laboratory, web browser, interactive

1. Introduction

In Thailand and some neighboring countries, a lot of educational institutes lack laboratory equipment for teaching and learning digital communications, considered as an important technical subject in the age of digital information. While efforts exist to develop low-cost hardware-based laboratory kits to alleviate the equipment shortage [1], an immediate improvement can be provided through a web-based or browser-based approach.

Although digital communications involves almost all activities in modern lifestyles, e.g., talking over a phone call, chatting in a social network, etc., the underlying technologies are usually unseen by users. This is because almost all transmitted data signals cannot be seen, heard, or touched. Without educational tools designed to make these signals visible, how data signals are actually transmitted over a physical medium remains a mystery to a large number of students.

While drawings of various types of data signals are available in textbooks, e.g., [2], they are often limited to few examples, which are passively absorbed by students. To stimulate more interest in the subject, an interactive training platform that allows students to actively determine data bits and various system parameters would be beneficial.

Several courses on digital communications rely on using computational software, e.g., MATLAB or Octave [3], [4], as a simulation tool to create data signals and perform various signal processing steps in the communication chain [5]. Such an approach is effective when students have some background in MATLAB/Octave programming. Otherwise, students may spend most of the laboratory hours debugging

MATLAB/Octave programs instead of thinking about how communication systems work.

The above-mentioned situations motivate us to develop a user-friendly browser-based digital communications training platform that will allow students to visualize important concepts in digital communications without a strong programming background. In particular, students may change system parameters simply by inputting their values through the platform's graphical user interface (GUI). Attempts are made to develop a system that can run on any standard web browser on any operating system, including Windows, Mac OS, and Android.

Section 2 describes underlying technologies and key features of the developed browser-based laboratory. Section 3 shows the list of topics covered up to now as well as example data signals that can be generated and displayed by the training platform. Section 4 presents some evaluation results obtained from various workshops organized in Thailand, with both Thais and non-Thais in the audience. Section 5 provides a conclusion and discusses plans for future extension.

2. Underlying Technologies and Key Features

In this section, the underlining technologies together with the key features of the developed browser-based digital communications training platform are described. The system has been designed with the following key features in mind.

1. The system shall cover fundamental topics in digital communications.
2. The system shall display signals at various stages in the communication chain, i.e., outputs from various components along the path from the transmitter to the receiver.
3. The system shall be interactive by allowing users to change input parameters and observe the corresponding consequences.
4. The system shall work for both offline and online scenarios.
5. The system's underlying application programs must be based on free software.

To achieve these goals, the training platform is developed using the JavaScript language [6], and can be run on any common web browser, e.g., Internet Explorer, Google Chrome, etc. All fundamental blocks in the digital communication systems are realized in the JavaScript environment, including transmitter/receiver, channel encoder/decoder, digital modulator/demodulator, pulse shaping filter/matched filter, and transmission channel.

In addition, a graph-plotting library called "flotcharts" is also incorporated; it offers a simple usage of its application

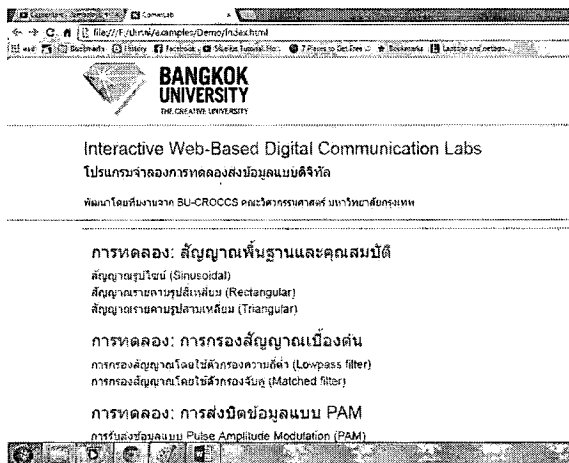


Figure 1. Starting window of the developed training platform.

program interfaces (APIs) for displaying different types of graphs. The JavaScript-based implementation of digital communications in conjunction with the graph-plotting library form the interactive browser-based digital communications training platform that can be operated either offline or online and is license free.

3. List of Topics and Example Data Signals

So far, the developed browser-based training platform provides interactive hands-on laboratory sessions covering the following topics, as shown on the starting windows of the platform in Fig. 1

1. Basic signals and their properties
2. Lowpass filtering and matched filtering
3. Pulse amplitude modulation (PAM)
4. Pulse width modulation (PWM)
5. Pulse position modulation (PPM)
6. Amplitude shift keying (ASK)
7. Frequency shift keying (FSK)
8. Phase shift keying (PSK)
9. Quadrature amplitude modulation (QAM)
10. Time/frequency/code division multiplexing
11. Error detection using parity check codes
12. Error correction using Hamming codes

Common to all the topics is the interactive feature of the developed training platform. In particular, students can specify transmitted data bits as well as some system parameters (when applicable) and see the effects of any change on the data signals.

Fig. 2 and 3 show example data signals for binary PAM and binary ASK, respectively. In each figure, the transmitted data signal is shown in yellow while the matched filter output at the receiver is shown in blue. It can be seen from Fig. 2 that, in binary PAM, bit 1 is mapped to a rectangular pulse with a positive value, while bit 0 is mapped to a negative value. For binary ASK in Fig. 3, bit 1 is mapped to a carrier signal (sinusoidal) with a high amplitude, while bit 0 is mapped to a low amplitude.

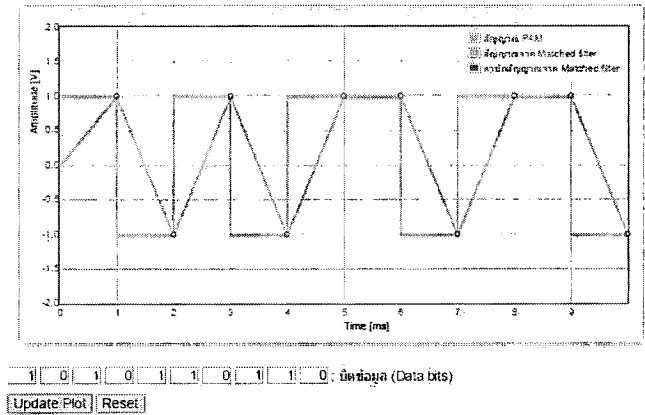


Figure 2. Transmitted PAM signal (in yellow) and matched filter output at the receiver (in blue); students can enter 10 data bits and see the effects on the signal waveforms.

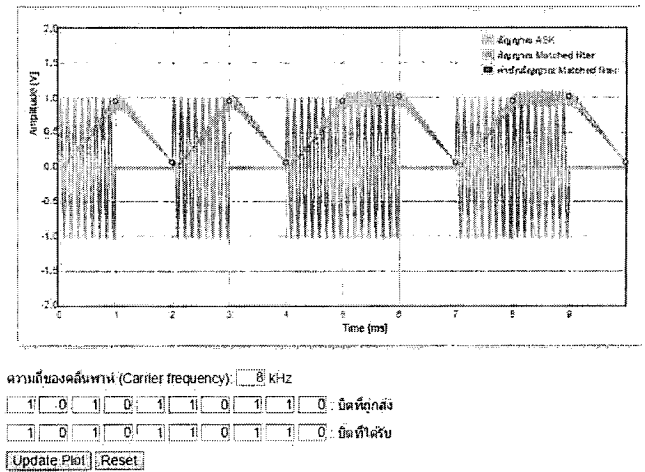


Figure 3. Transmitted ASK signal (in yellow) and downconverted matched filter output at the receiver (in blue).

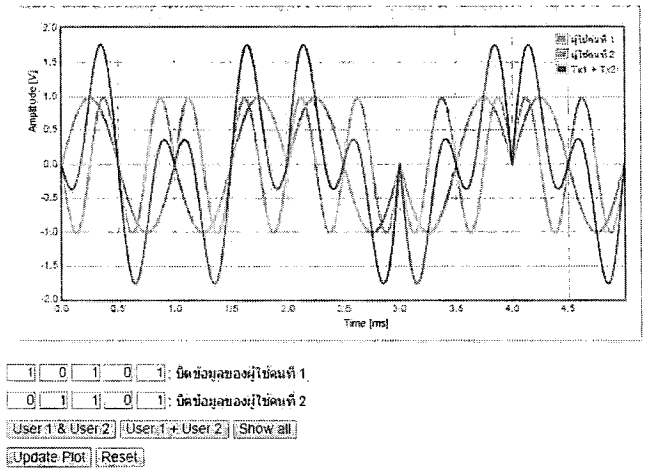


Figure 4. FDM signal (in red) with data from two users (in yellow and in blue); students can enter two sets of data bits, one set for user 1 and the other for user 2.

In each case, the 10 input boxes below the plot can be used to specify the 10 data bits, which are 1010110110 in Fig. 2 and 3. For ASK, a user can also specify the carrier frequency. By clicking “Update Plot” after changing data bits, a user can immediately observe changes in the data signals, making the laboratory experiences interactive.

Fig. 4 shows an example FDM signal (in red) resulting from multiplexing two data signals from two users at low and high carrier frequencies (shown in yellow and blue, respectively). Data bits are 10101 for user 1, and 01101 for user 2. Unlike before, FDM makes it difficult to indicate data bits from the signal waveform.

As an example of the interactive feature of the developed training platform, Fig. 5 illustrates a change in the data signal when transmitted data bits are changed from 1010110110 (as in Fig. 3) to 0101001101. As another example, Fig. 6 illustrates a change in the data signal when the carrier frequency is changed from 8 kHz (as in Fig. 5) to 16 kHz. Such interactive activities allow students to become more actively involved in the subject.

Finally, while Fig. 2–6 show screenshots from a personal computer, the training platform can be run on mobile devices as well. Fig. 7 shows the same experiment as in Fig. 3, i.e., ASK transmissions, but on a tablet as well as on a smartphone.

4. User Evaluation from Hands-On Workshops

We organized hands-on workshops on two occasions in Thailand. The first workshop was held at the ECTI-CON 2015 conference on 24 June 2015, with 25 participants. The second workshop was held at Asian Institute of Technology (AIT) on 3 July 2015, with 13 participants most of which are international students. Fig. 8 and 9 show the atmospheres at the two workshops, respectively.

In each workshop, due to a time limitation, a few experiments were chosen from the list of topics mentioned in Section 3. Participants ran the training platform on laptop PCs that were provided for them. The topics include baseband and passband modulation techniques.

At the end of each workshop, each participant was asked to evaluate the platform through a questionnaire. The evaluation results are shown in Table 1, with a strong agreement that the platform is easy to use without any requirement on programming skills. In addition, most participants agree that the platform can help them understand the fundamental concepts underlying digital communications.

5. Conclusion

We developed a browser-based digital communications training platform to help students visualize data signals used in digital communication systems. Since the developed platform is user-friendly and can run on any standard web browser on any operating system, we hope that it can be used to immediately alleviate the equipment shortage problem, e.g., in Thailand. In addition, students can learn on their own at any place at any time from their mobile devices, e.g., using a tablet or a smartphone. The platform can be run as an offline application or as an online web-based application.

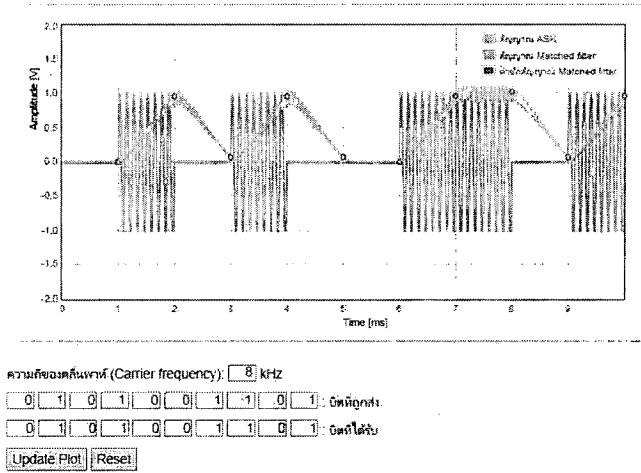


Figure 5. Modified ASK signals for data bits 0101001101 instead of 1010110110 as in Fig. 3.

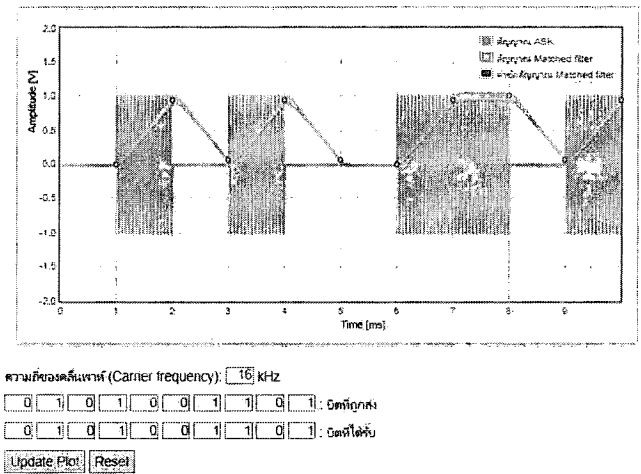


Figure 6. Modified ASK signals for carrier signal frequency 16 kHz instead of 8 kHz as in Fig. 5.

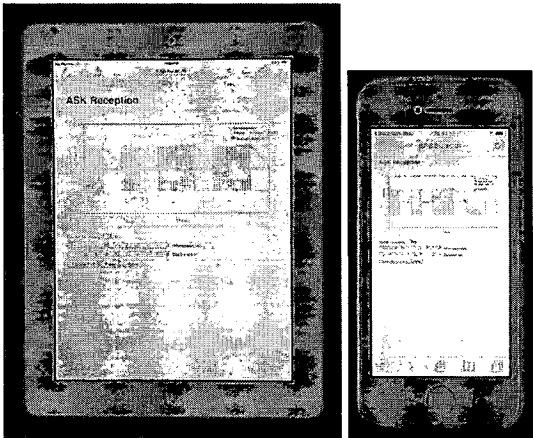


Figure 7. ASK experiment run on mobile devices, including a tablet (left) and a smartphone (right).

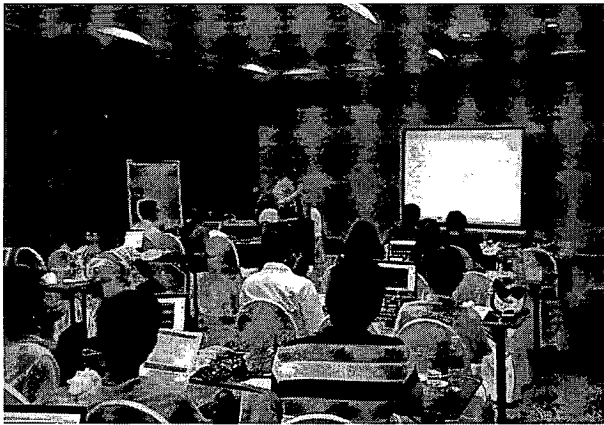


Figure 8. Atmosphere of the workshop held at the ECTI-CON 2015 conference on 24 June 2015.

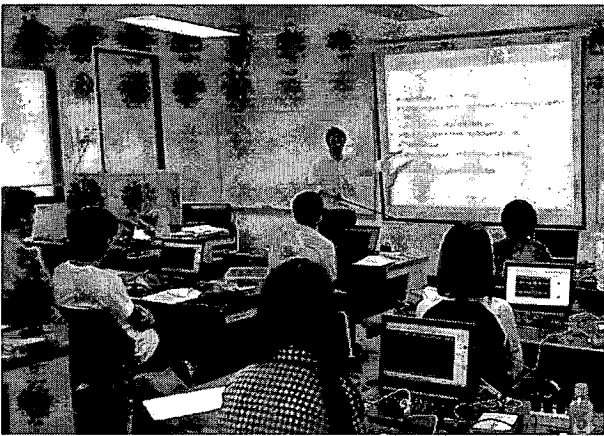


Figure 9. Atmosphere of the workshop held at AIT on 13 July 2015.

Table 1. Evaluation results of the developed browser-based digital communications laboratory from the participants in two hands-on workshops; each answer ranges from the score of 4 (strongly agree) to 1 (do not agree).

Question	4	3	2	1	No answer
Easy to use for self learning	23	13	1	–	1
Easy to use for teaching	23	13	1	–	1
Helpful in understanding digital communications	16	17	3	–	2

Directions for future developments include demonstrations of how random noise, e.g., additive white Gaussian noise (AWGN), and other channel impairments, e.g., dispersion, can affect the transmission performance. Interesting advanced topics that will also be considered include multi-carrier modulation techniques such as orthogonal frequency division multiplexing (OFDM).

Acknowledgement

The authors would like to thank Thailand Research Fund (TRF) for sponsoring this development project under the con-

tract number RDG5740028.

References

- [1] D.G. Michelson, D.W. Matolak, and W. Tong (Ed.), "Communications education and training: Software defined radio," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 182–209, May 2014.
- [2] S. Haykin, *Digital Communication Systems*, Wiley, 2013.
- [3] MATLAB, www.mathworks.com/products/matlab.
- [4] Octave, www.gnu.org/software/octave.
- [5] J.G. Proakis, M. Salehi, and G. Bauch, *Contemporary Communication Systems Using MATLAB, 3rd Edition*, CL Engineering, 2012.
- [6] J. Patterson, *JavaScript: A Beginner's Guide to Learning the Basics of Javascript Programming!*, Amazon Digital Services, 2016.