การออกแบบชิปวงจรรวมเฉพาะกิจสำหรับการประชุมทางโทรศัพท์ ในระบบพีซีเอ็ม

PCM CONFERENCE ASIC CHIP DESIGN

กรกฎ วัฒนวิเชียร และ อานุภาพ บุญส่งศรีกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ (02) 561-4621 ต่อ 1551 โทรสาร (02) 597-7566 fengkkw@nontri.ku.ac.th

Koarakot Wattanavichean and Anuparp Boonsongsrikul

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand. phone (02) 561-4612 ext. 1551. Fax. (02) 597-7566

fengkkw@nontri.ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้รายงานการออกแบบ สร้าง และทดสอบชิปการประชุมทางโทรศัพท์ในระบบพีซีเอ็ม ชิปที่ออกแบบมีข้อกำหนดดังนี้ รองรับการคอมแพนด์แบบ A-Law มีวงจรกำหนดช่องสัญญาณภายใน ใช้กับสัญญาณนาฬิกาความถี่ 4.096 MHz ใช้อัลกอริทึมหาค่ากำลังเฉลี่ยสัญญาณในทุก ๆ 8 msec ข้อมูลพีซีเอ็มเป็นแบบอนุกรม และทำการประชุมได้ 3 คนใน 1 กลุ่มการประชุม ใช้ภาษา VHDL ช่วยในการออกแบบ โดยใช้ซอฟต์แวร์ Workview PLUS เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบและจำลองการทำงานของวงจร หลังจากได้ผลการจำลองการทำงานถูกต้อง ได้นำข้อมูลการออกแบบไปโปรแกรมลงบน serial PROM เบอร์ XC 17256D ซึ่งใช้กับชิป FPGA เบอร์ XC 5210 ต้นแบบของวงจรการประชุมทางโทรศัพท์ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบทางฮาร์ดแวร์พร้อมชิป FPGA ผลการทดสอบปรากฏว่า ชิปวงจรรวมที่ออกแบบสามารถทำหน้าที่การประชุมได้ถูกต้อง

ABSTRACT

In this paper, a PCM conference ASIC chip design is reported. The designed chip has main features as follows: support standard A-Law companding, built-in time slot assignment circuit, 4.096 MHz clock, using 8 msec sampling period in calculating average signal power, serial PCM data and 3 parties conference in a group. The design is based on VHDL. Workview PLUS software is used as design entry and design verification tools. After the correct simulation result is obtained, design implementation is done by XACT software, followed by programming the data of the design onto the serial PROM (XC 17256D) together with FPGA (XC 5210). Prototype of a PCM conference circuit is constructed for hardware testing with FPGA chip. The results show that FPGA chip can correctly operate as a PCM conference chip.

1. บทนำ

ปัจจุบันการติดต่อสื่อสารหรือแม้กระทั่งการประชุมใด ๆ ก็ตามมักต้องการความสะดวก รวดเร็วและประหยัดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้สมาชิกเดินทางมาประชุม ณ สถานที่เดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงได้มีผู้คิดค้นและพัฒนาวิธีที่จะให้สมาชิกจากหลาย ๆ หน่วยงานสามารถประชุมร่วมกันได้โดยไม่ต้องพบกัน ซึ่งหนึ่งในแนวความคิดดังกล่าวก็คือการประชุมทางโทรศัพท์ (Bellamy, 1991) ในการประชุมทางโทรศัพท์อุปกรณ์ที่เป็นตัวจักรสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้การประชุมสามารถดำเนินการได้คือชิปการประชุมทางโทรศัพท์ ในทางการค้านั้นได้มีบริษัทที่ผลิตชิปการประชุมทางโทรศัพท์ขึ้นจำหน่ายอยู่ 2 ลักษณะดังนี้คือ

1. การรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน (SGS-Thomson Microelectronics, 1989; Mitel semiconductor, 1994) เป็นวิธีที่ดีที่สุดในแง่ของความถูกต้องที่ได้รับ และถูกต้องในแง่ความเป็นธรรมในการประชุม โดยจะใช้วิธีการรวมสัญญาณจากผู้ส่งทั้งหมดเข้าด้วยกันแล้วส่งสัญญาณที่ได้ไปสู่ผู้อื่น การรวมสัญญาณในที่นี้หมายถึงการแปลงสัญญาณทั้งหมดจากสัญญาณพีซีเอ็มที่ไม่เป็นเชิงเส้นไปเป็นสัญญาณเชิงเส้น (Tang and Wattanavichean, 1995) ก่อนแล้วจึงรวมสัญญาณทั้งหมดเข้าด้วยกันด้วยการใช้วงจรบวก จากนั้นจึงแปลงกลับไปเป็นสัญญาณพีซีเอ็มตามเดิมแล้วจึงส่งต่อให้ผู้รับรายละเอียดเกี่ยวกับการประชุมทางโทรศัพท์ในลักษณะการรวมสัญญาณเข้าด้วยกันสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง (กรกฎ, 2539)

2. การใช้เสียงดังที่สุด (Motorola Semiconductor, 1989) เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อัลกอริทึมดังกล่าวจะใช้หลักความจริง 2 ประการที่ว่า 1) เสียงของมนุษย์จะมีลักษณะที่ไม่คล้ายคลึงกัน (noncorrelation) และ 2) เสียงสนทนาของคนเราจะมีลักษณะที่เป็นคาบเวลา (pitch) ดังนั้นจึงเป็นผลให้สามารถทำการประชุมทางโทรศัพท์ได้ (อานุภาพ และกรกฎ, 2539) ข้อได้เปรียบของการใช้อัลกอริทึมนี้คือ 1) ไม่มีความเพี้ยนของสัญญาณเสียงเมื่อมีผู้ประชุมพูดเพียงคนเดียว ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง และ 2) สัญญาณเสียงที่ผู้ประชุมได้รับมีความชัดเจน เนื่องจากไม่มีวงจรบวกข้อมูลเชิงเส้นเหมือนกับอัลกอริทึมการรวมสัญญาณ

เข้าด้วยกัน ข้อมูลเชิงเส้นจะไม่มีข้อมูลที่แท้จริงเพียงอย่างเดียวแต่จะมีสัญญาณรบกวนปนเข้ามาด้วย ดังนั้นเมื่อบวกสัญญาณเชิงเส้นของผู้ประชุมทุกคนก็จะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนตามจำนวนผู้ประชุม และเมื่อแปลงกลับเป็นข้อมูลพีซีเอ็มจะทำให้เกิดความไม่คมชัดของสัญญาณเสียง

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ภาษา VHDL (Very high speed integrated circuit Hardware Description Language) (Mazor and Langstraat, 1992; Mentor Graphics Corp., 1992) ช่วยในการออกแบบวงจรทางดิจิตอล (Malvino and Leach, 1986) และใช้ซอฟต์แวร์ WorkView PLUS ของบริษัท Viewlogic ที่ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลช่วยในการเขียนภาษา VHDL (Viewlogic Inc, 1993A) การสังเคราะห์วงจร (Viewlogic Inc, 1993B) การจำลองการทำงาน (Viewlogic Inc, 1993C) และใช้ชิป FPGA (field programmable gate array) เบอร์ XC 5210 ร่วมกับ serial PROM เบอร์ XC 17256D ช่วยในการนำไปใช้ (implement) กับผลการออกแบบและใช้ในการทดสอบร่วมกับวงจรต้นแบบการประชุมทางโทรศัพท์ที่สร้างขึ้น รายละเอียดเกี่ยวกับชิป FPGA สามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง (Xilinx Inc., 1995; วิชัย และ กรกฎ 2536) สำหรับในบทความนี้ หัวข้อ 2 จะกล่าวถึงข้อกำหนดรายละเอียดของชิป หัวข้อ 3 จะอธิบายหลักการออกแบบ หัวข้อ 4 แสดงผลการทดลองและวิจารณ์ และหัวข้อ 5 เป็นการสรุปผลการวิจัย

2 ข้อกำหนดรายละเอียดของชิป

ชิปการประชุมทางโทรศัพท์ที่ต้องการออกแบบมีข้อกำหนดรายละเอียดดังนี้

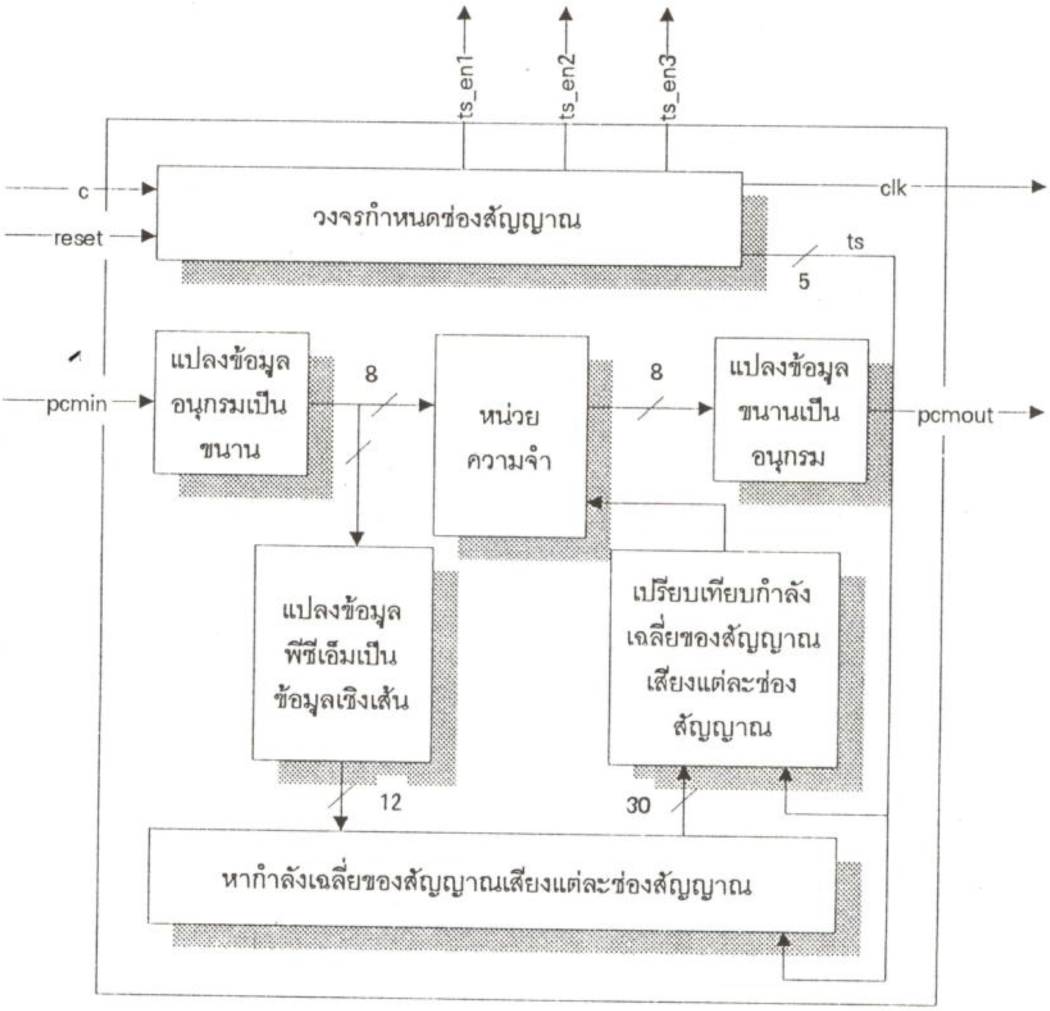
- ใช้กับไฟเลี้ยงขนาด +5V
- รองรับมาตรฐานการคอมแพนด์ข้อมูลพีซีเอ็มแบบ A-Law
- มีวงจรกำหนดช่องสัญญาณอยู่ภายในชิป
- สัญญาณนาฬิกาของระบบใช้ความถี่ 4.096 MHz
- ใช้กับข้อมูลพีซีเอ็มแบบอนุกรมที่มีอัตราเร็ว 2.048 Mbit/sec
- สามารถรองรับการประชุมทางโทรศัพท์ได้ 3 ช่องสัญญาณ (ขยายได้ถึง 8 ช่องสัญญาณต่อ 1 การประชุมหากต้องการ)

3 หลักการออกแบบ

ในการออกแบบจะแบ่งการทำงานออกเป็น 7 มอดูลซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 1

3.1 หลักการทำงานของชิป

เริ่มต้นด้วยมอดูลการแปลงข้อมูลพีซีเอ็มแบบอนุกรมเป็นแบบขนาน ข้อมูลพีซีเอ็มที่ใช้งานมีลักษณะเป็นมัลติ-เฟรม (multi-frame) ใน 1 เฟรมประกอบด้วย 32 ช่องสัญญาณ ในแต่ละช่องสัญญาณจะมีข้อมูลพีซีเอ็มขนาด 8 บิตเรียงอนุกรมกันมา จำนวนบิตใน 1 เฟรมจะมี 256 บิต (32 x 8) และใน 1 เฟรม จะใช้เวลา 125 μsec ดังนั้นใน 1 วินาทีจะส่งได้ 2.048 Mbit (256/125) หรืออัตราเร็วของระบบนี้เท่ากับ 2.048 Mbit/sec ซึ่งเป็นอัตราที่ใช้กับระบบโทรศัพท์แบบพีซีเอ็มในยุโรป เอเชีย รวมทั้งประเทศไทย การแปลงข้อมูลพีซีเอ็มแบบอนุกรมเป็นแบบขนานขนาด 8 บิต ต้องแปลงให้เข้าจังหวะ (synchronizing) พอดีกับช่องสัญญาณที่ต้องการเข้าร่วมประชุม เพราะถ้าไม่เข้าจังหวะข้อมูลพีซีเอ็มที่แปลงเข้ามาจะเกิดข้อผิดพลาดได้ จากนั้นนำข้อมูลพีซีเอ็มแบบขนานขนาด 8 บิต มาทำการถอดรหัสเพื่อเป็นข้อมูลเชิงเส้นขนาด 12 บิต ความจำเป็นที่ต้องถอดรหัสดังกล่าว เพราะเป็นการถอดรหัสตามมาตรฐานการคอมแพนด์แบบ A-Law ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าในการแปลงสัญญาณเสียงเป็นเชิงเลข (voice digitization) ถ้าต้องการคุณภาพเสียงดีเป็นที่ยอมรับได้ต้องใช้จำนวนบิตในการเข้ารหัสถึง 13 บิต ซึ่งจะให้



รูปที่ 1 มอดูลต่าง ๆ ภายในวงจรชิปการประชุมทางโทรศัพท์

ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณความผิดเพี้ยน (signal to distortion ratio) ประมาณ 30 dB ภายในพิสัยพลวัตประมาณ 40 dB (Motorola Semiconductor, 1995)

อย่างไรก็ตาม การเข้ารหัสโดยใช้จำนวนบิตถึง 13 บิต จะให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณความผิดเพี้ยนที่มากเกินความจำเป็นในช่วงแอมพลิจูดสูง ๆ ของสัญญาณ นอกจากนี้แอมพลิจูดของสัญญาณที่มีขนาดใหญ่มักจะไม่เกิดขึ้นบ่อยนัก ด้วยเหตุนี้วิธีที่ใช้เพื่อให้ช่วงที่สัญญาณแอมพลิจูดสูง ๆ มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณความผิดเพี้ยนไม่มากจนเกินไป และที่แอมพลิจูดต่ำ ๆ มีค่ากำลังของสัญญาณต่อสัญญาณความผิดเพี้ยนเป็นที่ยอมรับได้ คือ การควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ (nonuniform quantization) กล่าวคือที่บริเวณแอมพลิจูดต่ำจะมีควอนไทซ์ของสัญญาณเสียงที่ชิดกันมากและที่แอมพลิจูดขนาดใหญ่จะมีการควอนไทซ์ของสัญญาณเสียงที่ห่างกัน ลักษณะดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (nonlinear relation) ระหว่างค่ารหัส (code words) 8 บิต และค่าชักตัวอย่าง (samples) 13 บิตในแบบ A-Law ที่แสดงถึงระดับแอมพลิจูดของสัญญาณเสียง การควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอนี้จะใช้หลักการคอมแพนด์เข้าช่วยจัดการ (Bellamy, 1991)

ข้อมูลพีซีเอ็ม 8 บิตจะแทนระดับแอมพลิจูดของสัญญาณเสียงซึ่งแสดงอยู่ในรูปเชิงเส้นขนาด 13 บิต ที่มีระดับทั้งหมด 2^8 = 256 ระดับ การหากำลังเฉลี่ย

ของสัญญาณนั้นจะคิดเฉพาะขนาดของแอมพลิจูดไม่คิดเครื่องหมาย ดังนั้นขนาดของข้อมูลเชิงเส้นเหลือแค่ 12 บิต และระดับของแอมพลิจูดสัญญาณเสียงเหลือ 128 ระดับ

หลังจากถอดรหัสข้อมูลพีซีเอ็มขนาด 8 บิตเป็นข้อมูลเชิงเส้นขนาด 12 บิตได้แล้ว นำข้อมูลเชิงเส้นที่ได้มาคำนวณหากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียง เนื่องจากความถี่ของเสียงมนุษย์มีความถี่ไม่แน่นอนและสัญญาณเสียงที่ใช้ในระบบโทรศัพท์นั้นถูกจำกัดให้มีความถี่ระหว่าง 300 Hz - 3.4 kHz (ถวิล กิ่งทอง, 2535) หรือคาบเวลาของสัญญาณเสียงมนุษย์อยู่ในช่วงระหว่าง 0.294-3.333 msec ดังนั้นการคำนวณหากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงจึงเลือกใช้ช่วงเวลา 8 msec เป็นช่วงเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณเสียงเพราะจะครอบคลุมคาบเวลาของสัญญาณเสียงมนุษย์ การคำนวณหากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงจะให้ข้อมูลขนาด 30 บิต การได้มาของข้อมูลขนาด 30 บิต เกิดจากการอินทิเกรตข้อมูลเชิงเส้นที่ยกกำลังสองในช่วงเวลา 8 msec ในทางปฏิบัติทำได้โดยการนำข้อมูลเชิงเส้นขนาด 12 บิต มายกกำลังสองซึ่งจะให้ผลลัพธ์ขนาด 24 บิต และเก็บสะสมเป็นจำนวน 64 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะใช้เวลาห่างกันเท่ากับ 125 μsec (เท่ากับระยะเวลา 1 เฟรม) ทำให้ช่วงเวลาในการอินทิเกรตเท่ากับ 8 msec (64 x 125 μsec) ดังนั้นผลลัพธ์ที่เป็นเอาต์พุตของมอดูลหากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงของแต่ละช่องสัญญาณของผู้ร่วมประชุมจะมีขนาด 30 บิต (24 บิต x 64) ต่อจากนั้นนำข้อมูล 30 บิตนี้มาทำการเปรียบเทียบกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงในแต่ละช่องสัญญาณและที่เอาต์พุตของมอดูล การเปรียบเทียบกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงจะให้สัญญาณควบคุมไปที่มอดูลหน่วยความจำเพื่อเก็บข้อมูลพีซีเอ็มของผู้ร่วมประชุมที่มีกำลังเฉลี่ยสูงสุด และส่งต่อไปให้กับช่องสัญญาณของผู้ร่วมประชุมทุก ๆ คนต่อไป

3.2 การทำงานของแต่ละมอดูล

- **มอดูลแปลงข้อมูลพีซีเอ็มแบบอนุกรมเป็นแบบขนาน** มอดูลนี้จะรับข้อมูลพีซีเอ็มแบบอนุกรมเข้ามาด้วยอัตราเร็ว 2.048 Mbit/sec ที่ขาสัญญาณ pcmin ของชิปในรูปที่ 2 ข้อมูลพีซีเอ็มในแต่ละช่องสัญญาณที่ต้องการเข้าร่วมประชุมมีขนาด 8 บิต และนำข้อมูลพีซีเอ็มเข้ามาแปลงเป็นข้อมูลแบบขนานขนาด 8 บิตเพื่อส่งต่อไปยังมอดูลหน่วยความจำและมอดูลแปลงข้อมูลพีซีเอ็มเป็นข้อมูลเชิงเส้น
- **มอดูลหน่วยความจำ** มอดูลนี้จะเก็บข้อมูลพีซีเอ็มแบบขนานขนาด 8 บิตของผู้ร่วมประชุมที่มีกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงที่สูงสุดและจะใช้หน่วยความจำขนาด 1 ไบต์ในการเก็บข้อมูลพีซีเอ็มแบบขนานขนาด 8 บิตซึ่งจะทำการเก็บทุก ๆ เฟรม ตัวอย่างเช่น การประชุมทางโทรศัพท์ 3 ช่องสัญญาณ โดยในเฟรม n มีข้อมูลพีซีเอ็มแบบขนานขนาด 8 บิตของผู้ร่วมประชุม a b และ c เป็น AA A5 และ B5 ตามลำดับ (แสดงตัวเลขในฐาน 16) กำหนดให้ข้อมูลของผู้ประชุม a เป็นข้อมูลที่มีกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงสูงสุด นั่นคือ มอดูลหน่วยความจำจะเก็บข้อมูลพีซีเอ็ม AA เท่านั้น และถ้าในเฟรม n+1 ข้อมูลพีซีเอ็มของผู้ประชุม a เป็น 85 มอดูลหน่วยความจำจะเก็บข้อมูลพีซีเอ็ม 85 ไปแทนที่ตำแหน่งที่เก็บข้อมูล AA ในเฟรม n การอ่านหรือการเขียนข้อมูลพีซีเอ็มลงบนหน่วยความจำนี้จะมีสัญญาณควบคุมมาจากมอดูลเปรียบเทียบกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงของแต่ละช่องสัญญาณ
- **มอดูลแปลงข้อมูลพีซีเอ็มเป็นข้อมูลเชิงเส้น** มอดูลนี้จะถอดรหัสข้อมูลพีซีเอ็มขนาด 8 บิตเป็นข้อมูลเชิงเส้นขนาด 12 บิต เพื่อนำข้อมูลเชิงเส้นคำนวณหากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงของ

ผู้ประชุม ตัวอย่างเช่น ข้อมูลพีซีเอ็มเป็น S0101010 โดยที่ S คือบิตเครื่องหมาย และไม่ว่า S จะเป็น 0 หรือ 1 ก็ตาม เมื่อแปลงเป็นข้อมูลเชิงเส้นจะได้ 111111000000 ซึ่งเท่ากับ 4032 ดังในตารางที่ 1 เป็นต้น

ตารางที่ 1 การเข้ารหัส-ถอดรหัสข้อมูลพีซีเอ็มตามมาตรฐานการคอมแพนด์แบบ A-Law (Motorola Semiconductor, 1995)

Chord No.	No. of Steps	Step size	Normalized encode decision levels	Digital Code 1 sign	2 chord	3 chord	4 chord	5 step	6 step	7 step	8 step	Normalized decode levels
7	16	128	4096	1	0	1	0	1	0	1	0	4032
			3968 ⋮				⋮					⋮
			2176	1	0	1	0	0	1	0	1	2112
6	16	64	2048 ⋮				⋮					⋮
			1088	1	0	1	1	0	1	0	1	1056
6	16	64	1024 ⋮				⋮					⋮
			544	1	0	0	0	0	1	0	1	528
6	16	64	512 ⋮				⋮					⋮
			272	1	0	0	1	0	1	0	1	264
6	16	64	256 ⋮				⋮					⋮
			136	1	1	1	0	0	1	0	1	132
6	16	64	128 ⋮				⋮					⋮
			68	1	1	1	1	0	1	0	1	66
6	16	64	64 ⋮				⋮					⋮
			2	1	1	0	1	0	1	0	1	1
			0									

NOTES:

1. Characteristics are symmetrical about analog zero with sign bit = 0 for negative analog values.
2. Digital code includes alternate bit inversion, as specified by CCITT.

- **มอดูลหากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงของแต่ละช่องสัญญาณ** เป็นมอดูลที่ประกอบด้วย วงจรบวกและวงจรยกกำลังสองของสัญญาณเชิงเส้นซึ่งถูกแปลงมาจากสัญญาณพีซีเอ็มที่ได้จากการชักตัวอย่าง (sampling) จากสัญญาณเสียงด้วยความถี่ 8 KHz หรือทุก ๆ 125 µsec การหากำลังเฉลี่ยของสัญญาณคาบเวลาสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตข้อมูลเชิงเส้นที่ยกกำลังสองของผู้ร่วมประชุมแต่ละคนในช่วงเวลาทุก ๆ 8 msec ตามสมการ (1) (Carlson, 1986) ดังนี้

$$P = \frac{1}{T_o} \int_0^{T_o} |v(t)|^2 dt \qquad (1)$$

โดยที่

P = กำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียง

$v(t)$ = ระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณเสียง

T_o = ช่วงเวลาที่ใช้ในการอินทิเกรตเท่ากับ 8 msec

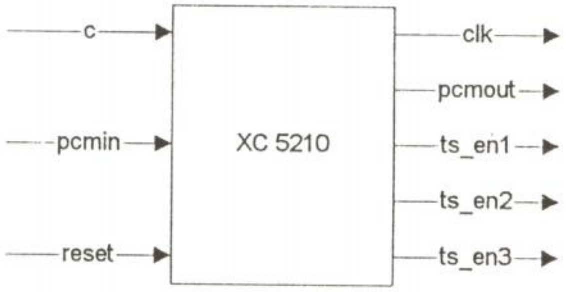
ในทางปฏิบัติคือทำการเก็บข้อมูลเชิงเส้นที่ยกกำลังสองแล้วเป็นจำนวน 64 ครั้ง จากนั้นจึงส่งผลลัพธ์ในการเก็บข้อมูลดังกล่าวไปให้มอดูลเปรียบเทียบกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียง

- **มอดูลการเปรียบเทียบกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงของแต่ละช่องสัญญาณ** เป็นมอดูลที่ทำหน้าที่ในการเปรียบเทียบกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียง ในการออกแบบเลือกใช้ความถี่ 125 Hz ต่อหนึ่งครั้งการตัดสินใจว่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงของช่องสัญญาณใดจะมีค่าสูงสุดหรืออาจกล่าวได้ว่าช่วงเวลาในการตัดสินใจจะใช้ทุก ๆ 8 msec ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาในการอินทิเกรตข้อมูล และเอาต์พุตของมอดูลนี้จะส่งสัญญาณควบคุมในการอ่านหรือเขียนข้อมูลพีซีเอ็มบนมอดูลหน่วยความจำ
- **มอดูลกำหนดช่องสัญญาณ** เป็นมอดูลที่ประกอบด้วยวงจรนับและวงจรหารเวลา โดยสัญญาณนาฬิกา 4.096 MHz เป็นสัญญาณอินพุต มอดูลนี้ทำหน้าที่ในการสร้างช่องสัญญาณที่ 0 ถึง 31 ในเฟรม ๆ หนึ่งเพื่อส่งไปยังมอดูลต่าง ๆ เอาต์พุตของมอดูลนี้จะให้ข้อมูลขนาด 5 บิต
- **มอดูลการแปลงข้อมูลพีซีเอ็มแบบขนานเป็นแบบอนุกรม** มอดูลนี้เป็นมอดูลที่ทำหน้าที่ในการแปลงข้อมูลพีซีเอ็มแบบขนานที่ส่งมาจากมอดูล

หน่วยความจำให้เป็นข้อมูลพีซีเอ็มแบบอนุกรมเพื่อส่งให้กับขาสัญญาณ pcmout ของชิปในรูปที่ 2

3.3 หน้าที่การทำงานของแต่ละขา

ชิปการประชุมทางโทรศัพท์ที่ออกแบบซึ่งโปรแกรมลงบนชิป FPGA เบอร์ XC 5210 จะมีขาสัญญาณทั้งหมด 8 ขา แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขาสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของชิปการประชุมทางโทรศัพท์ที่ออกแบบ

1. ขา c รับสัญญาณนาฬิกาความถี่ 4.096 MHz จากภายนอกเพื่อใช้เป็นฐานเวลาของสัญญาณนาฬิกาของระบบ
2. ขา clk ให้สัญญาณนาฬิกาความถี่ 2.048 MHz ใช้เป็นฐานเวลาในการรับ-ส่งข้อมูลพีซีเอ็ม
3. ขา reset ใช้สำหรับในการเริ่มการทำงานของชิป
4. ขา pcmin ใช้เป็นขารับข้อมูลพีซีเอ็มแบบอนุกรมที่ช่องสัญญาณด้านรับ
5. ขา pcmout ใช้เป็นขาส่งข้อมูลพีซีเอ็มแบบอนุกรมที่ช่องสัญญาณด้านส่ง
6. ขา ts_en1 เป็นขาสัญญาณที่บอกให้ชิป CODEC ส่งข้อมูลพีซีเอ็มของผู้ประชุมคนที่ 1 มาที่ขาสัญญาณ pcmin และให้ชิป CODEC รับข้อมูลพีซีเอ็มจากขาสัญญาณ pcmout ที่เวลา t_1
7. ขา ts_en2 เป็นขาสัญญาณที่บอกให้ชิป CODEC ส่งข้อมูลพีซีเอ็มของผู้ประชุมคนที่ 2 มาที่ขาสัญญาณ pcmin และให้ชิป CODEC รับข้อมูลพีซีเอ็มจากขาสัญญาณ pcmout ที่เวลา t_2
8. ขา ts_en3 เป็นขาสัญญาณที่บอกให้ชิป CODEC ส่งข้อมูลพีซีเอ็มของผู้ประชุมคนที่ 3 มาที่ขาสัญญาณ pcmin และให้ชิป CODEC รับข้อมูลพีซีเอ็มจากขาสัญญาณ pcmout ที่เวลา t_3

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการจำลองการทำงาน

ผลการจำลองการทำงานที่ได้จากโปรแกรม Viewsim ของซอฟต์แวร์ Workview PLUS ซึ่งทำงานอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลแสดงดังในรูปที่ 3 แผนภาพเวลาของชิปการประชุมทางโทรศัพท์ (ช่วงเริ่มส่งข้อมูลชุดแรก) โดยมีรายละเอียดของสัญญาณต่าง ๆ ดังนี้

- clk เป็นสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ 2.048 MHz ทำหน้าที่เป็นฐานเวลาในการรับ-ส่งข้อมูลพีซีเอ็ม
- ck เป็นสัญญาณนาฬิกาภายในที่มีความถี่ 256 kHz ทำหน้าที่เป็นฐานเวลาให้กับช่องสัญญาณ
- reset เป็นสัญญาณอินพุต ทำหน้าที่ในการเริ่มต้นการทำงานของชิปโดยเริ่มทำงานที่ขอบขาลง
- pcmin เป็นสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นข้อมูลพีซีเอ็มที่มีอัตราเร็ว 2.048 Mbit/sec
- data_i เป็นสัญญาณภายในซึ่งเป็นเอาต์พุตมาจากมอดูลการแปลงข้อมูลพีซีเอ็มแบบอนุกรมเป็นแบบขนานขนาด 8 บิต เพื่อส่งต่อไปยังมอดูลหน่วยความจำและมอดูลการแปลงข้อมูลพีซีเอ็มเป็นข้อมูลเชิงเส้น
- data_o เป็นสัญญาณภายในขนาด 8 บิตซึ่งเป็นเอาต์พุตมาจากมอดูลหน่วยความจำเพื่อส่งต่อไปยังมอดูลการแปลงข้อมูลพีซีเอ็มแบบขนานเป็นแบบอนุกรม
- cp_cd เป็นสัญญาณภายในขนาด 8 บิตซึ่งอยู่ในรูปพีซีเอ็มที่ได้รับการแปลงผกผันของบิตคู่ (even bit inversion) แล้ว โดยแปลงมาจากสัญญาณพีซีเอ็มที่อยู่ในรูปแบบของการผกผันของบิตคู่ ตามข้อกำหนดของ CCITT (Motorola semiconductor, 1995)

- linear เป็นสัญญาณภายในขนาด 12 บิตซึ่งเป็นสัญญาณเชิงเส้น
- lin_2 เป็นสัญญาณภายในขนาด 24 บิต ซึ่งเป็นสัญญาณเชิงเส้นที่ยกกำลังสอง
- pcmout เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่จะส่งข้อมูลพีซีเอ็มให้กับช่องสัญญาณของผู้ประชุม
- tslot เป็นสัญญาณภายในขนาด 5 บิต ซึ่งทำหน้าที่สร้างช่องสัญญาณจำนวน 32 ช่องสัญญาณ
- ts_max เป็นสัญญาณภายในขนาด 5 บิต ใช้บอกว่าช่องสัญญาณไหนมีข้อมูลของสัญญาณเสียงที่มีกำลังเฉลี่ยสูงที่สุด
- ts_en1 เป็นสัญญาณเอาต์พุต ทำหน้าที่บอกให้ชิป CODEC ส่งข้อมูลพีซีเอ็มของผู้ประชุมคนที่ 1 มาที่ขาสัญญาณ pcmin และให้ชิป CODEC รับข้อมูลพีซีเอ็มจากขาสัญญาณ pcmout ที่เวลา t_1
- ts_en2 เป็นสัญญาณเอาต์พุต ทำหน้าที่บอกให้ชิป CODEC ส่งข้อมูลพีซีเอ็มของผู้ประชุมคนที่ 2 มาที่ขาสัญญาณ pcmin และให้ชิป CODEC รับข้อมูลพีซีเอ็มจากขาสัญญาณ pcmout ที่เวลา t_2
- ts_en3 เป็นสัญญาณเอาต์พุต ทำหน้าที่บอกให้ชิป CODEC ส่งข้อมูลพีซีเอ็มของผู้ประชุมคนที่ 3 มาที่ขาสัญญาณ pcmin และให้ชิป CODEC รับข้อมูลพีซีเอ็มจากขาสัญญาณ pcmout ที่เวลา t_3

การจำลองการทำงานเริ่มด้วยการกำหนดค่าพีซีเอ็มให้กับช่องสัญญาณของผู้ร่วมประชุมคนที่ 1 2 และคนที่ 3 มีค่าเป็น 03 07 และ 01 (แสดงเป็นค่าตัวเลขฐานสิบหก) ที่ช่องสัญญาณ 02 04 และ 06 ตามลำดับ

ผลการจำลองการทำงานนั้น ช่วงเริ่มต้นของการจำลองการทำงานยังไม่มีการเก็บข้อมูลพีซีเอ็มลงในมอดูลหน่วยความจำเนื่องจากเวลายังไม่ถึง 8 msec ซึ่งเป็นช่วงเวลาในการอินทิเกรต และยังไม่ได้ตัดสินใจว่าข้อมูลในช่องสัญญาณไหนมีกำลังเฉลี่ยของสัญญาณสูงสุด เพราะฉะนั้นจึงยังไม่มีข้อมูลพีซีเอ็มออกมาจากชิปที่สัญญาณ pcmout หลังจากนั้นที่เวลา 8.163 msec เป็นต้นไปข้อมูลชุดแรกจะเริ่มส่งออกมา ซึ่งข้อมูลที่มีค่ากำลังเฉลี่ยสูงสุดจะต้องส่งออกมาที่สัญญาณ pcmout เท่านั้น

เมื่อนำค่าพีซีเอ็มทั้งสามคือ 03 07 และ 01 มาแปลงเป็นค่าเชิงเส้นจะได้ 2DO 250 และ 290 และนำค่าเชิงเส้นทั้งสามมายกกำลังสอง ผลลัพธ์ที่ได้คือ 7E900 55900 และ 69100 ซึ่งเป็นข้อมูลของช่องสัญญาณที่ 02 04 และ 06 ตามลำดับ และทุก ๆ เฟรมก็จะได้ค่าเชิงเส้นที่ยกกำลังสองเหล่านี้ เมื่อถึงเฟรมที่ 64 (เวลา 8.156 msec) ผลลัพธ์การเก็บสะสมข้อมูลของช่องสัญญาณที่ 2 จะมีค่าสูงสุด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในช่องสัญญาณด้านส่ง 02 ของผู้ประชุมคนที่ 1 จะมีกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงสูงสุด ข้อมูลพีซีเอ็ม 03 ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตในช่องสัญญาณ 02 จะมาเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่สัญญาณ pcmout ซึ่งช่องสัญญาณด้านรับของผู้ประชุมทุกคนจะได้รับข้อมูลนี้

4.2 ผลการทดสอบกับเครื่องต้นแบบการประชุมทางโทรศัพท์

1) ผลการทดสอบทางไฟฟ้า

หลังจากทำการจำลองการทำงานจนได้ผลถูกต้อง ขั้นตอนต่อไปได้ทำการทดสอบชิป FPGA (ที่โปรแกรมวงจรการประชุมทางโทรศัพท์) กับเครื่องต้นแบบการประชุมทางโทรศัพท์ที่สร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 การทดสอบทำโดยการป้อนสัญญาณเสียงเข้าที่เครื่องโทรศัพท์ด้วยระดับความดังของเสียงที่แตกต่างกัน 3 ระดับ โดยกำหนดให้สัญญาณที่ Ch1 เป็นข้อมูลของผู้ประชุมคนที่ 1 มีระดับสัญญาณสูงสุดที่เวลา T_1 จากนั้นเปลี่ยนเป็นสัญญาณที่ Ch2 ซึ่งกำหนดเป็นข้อมูลของผู้ประชุมคนที่ 2 มีระดับสัญญาณสูงสุดที่เวลา T_2 ทุกครั้งที่กำหนดระดับสัญญาณเสียงที่แตกต่างกัน (T_1 และ T_2) จะทำการวัดข้อมูลอนาลอกที่เป็นเอาต์พุต (Ch4) ของชิป CODEC (ทำหน้าที่ใน

การแปลงสัญญาณดิจิตอลไปเป็นสัญญาณอนาลอก และแปลงสัญญาณอนาลอกไปเป็นสัญญาณดิจิตอล) ซึ่งส่งสัญญาณต่อไปยังชิป SLIC (ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับเครื่องโทรศัพท์) ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

ผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่เวลา T_1 หรือ T_2 สัญญาณอินพุต (Ch1 หรือ Ch2) ที่มีระดับสัญญาณสูงสุดจะเป็นสัญญาณเอาต์พุต (Ch4) เสมอ และในการวัดที่เวลาใด ๆ ที่เอาต์พุตทางด้านอนาลอกของชิป CODEC ทุกตัวจะพบสัญญาณเสียงที่มีค่ากำลังเฉลี่ยสูงสุดเสมอเช่นกัน สำหรับค่าความหน่วงเวลาระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของสัญญาณคือ 400 μsec

สำหรับผลการทดสอบสัญญาณข้อมูลพีซีเอ็มทางด้านอินพุตและเอาต์พุตสามารถดูรายละเอียดได้จากเอกสารอ้างอิง (อานุภาพ, 2541)

2) **ผลการทดสอบทางกายภาพ**

การทดสอบทางไฟฟ้านั้นยังไม่สามารถทราบถึงคุณภาพของเสียงในการประชุมทางโทรศัพท์ว่าดีเพียงใด ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบทางกายภาพเพื่อความแน่ใจว่าจะสามารถใช้ชิปดังกล่าวประกอบกับการประชุมทางโทรศัพท์ได้จริง การทดสอบชิปการประชุมทางโทรศัพท์ทางกายภาพทำได้โดยการติดตั้งชิป FPGA ที่โปรแกรมวงจรการประชุมทางโทรศัพท์ที่ได้ออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วลงในเครื่องต้นแบบการประชุมทางโทรศัพท์ที่สร้างขึ้น จากนั้นใช้ผู้ประชุม 3 คน ทำการประชุมทางโทรศัพท์ โดยเสียงพูดของผู้ประชุมทั้ง 3 มีระดับความดังที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เสียงพูดของผู้ประชุมที่มีเสียงดังที่สุดจะไปปรากฏบนเครื่องรับโทรศัพท์ของผู้ร่วมประชุมอีก 2 คน โดยเสียงพูดนั้นไม่มีสัญญาณรบกวน ซึ่งสามารถทำการประชุมทางโทรศัพท์กันได้จริงตามความคาดหมาย

4.3 วิจารณ์

การออกแบบได้คำนวณหาค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงของผู้ประชุมที่มีค่าสูงสุดเท่านั้น ไม่ได้คำนวณหาค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงของผู้ประชุมที่มีค่ารองถัดไป อัลกอริทึมการใช้เสียงดังที่สุด (Motolora Semiconductor, 1989) ได้กำหนดไว้ว่า ช่องสัญญาณของผู้ที่มีกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงที่สูงสุดจะต้องมีข้อมูลของผู้ที่มีกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงรองถัดไปแต่ในการออกแบบในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ช่องสัญญาณของผู้ที่มีกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงสูงสุดมีข้อมูลของตนเองแทน เนื่องจากถ้าในการประชุมมีการพูดทีละคนจะทำให้มีแต่คนที่พูดเสียงดังที่สุดเพียงคนเดียว ไม่มีคนที่พูดเสียงดังรองถัดไป ดังนั้นการออกแบบจึงไม่ได้คำนวณหาค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงรองถัดไป อย่างไรก็ตามแม้ว่าระหว่างการประชุมถ้ามีผู้หนึ่งผู้ใดพูดแทรกขึ้นมาในขณะที่มีผู้ประชุมท่านหนึ่งกำลังพูดอยู่ ผู้ประชุมทุกท่านก็จะได้ยินคำพูดแทรกนี้เช่นกัน เพราะเสียงพูดของผู้ประชุมที่กำลังพูดอยู่นั้นก็มีลักษณะที่เป็นคาบเวลาและมีแอมพลิจูดไม่คงที่ ถ้าช่วงเวลาของเสียงผู้ประชุมที่กำลังพูดมีแอมพลิจูดต่ำไปตรงกับช่วงเวลาของเสียงผู้ประชุมที่พูดแทรกซึ่งมีแอมพลิจูดสูง ผู้ประชุมทุกคนก็จะได้ยินเสียงแทรกนี้ ลักษณะดังกล่าวมีโอกาสเกิดขึ้นสูงเพราะเสียงของมนุษย์ในแต่ละคนมีลักษณะที่ไม่คล้ายคลึงกันจึงทำให้ไม่มีผู้หนึ่งผู้ใดสามารถพูดเสียงดังได้ตลอดเวลา

นอกจากนี้ การประชุมทางโทรศัพท์อาจสามารถเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณในการประชุมได้มากกว่า 3 ช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถเพิ่มได้ถึง 8 ช่องสัญญาณต่อ 1 กลุ่มการประชุม และในการทดสอบกับวงจรต้นแบบก็ได้ใช้ผู้ประชุมจริงจำนวน 8 คน เพื่อทำการประชุม 1 กลุ่มการประชุม ซึ่งได้ผลการทดสอบเช่นเดียวกับในกรณีที่ใช้ผู้ร่วมประชุม 3 คน สำหรับการออกแบบให้มีผู้ร่วมประชุมมากขึ้นใน 1 กลุ่มการประชุมก็ยังคงใช้หลักการออกแบบดังที่กล่าวไปแล้วเพียงแต่มอดูลการหากำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงของแต่ละช่องสัญญาณ

จะมีขนาดใหญ่ขึ้น อันเนื่องจากต้องใช้ฟลิปฟลอบเพื่อเก็บข้อมูลมากขึ้นตามจำนวนผู้ประชุม

5. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบ สร้าง และทดสอบชิปการประชุมทางโทรศัพท์ โดยโปรแกรมข้อมูลการออกแบบลงบนชิป FPGA เบอร์ XC 5210 ชิปที่ออกแบบสามารถใช้งานได้กับแรงดัน +5 V รองรับการคอมแพนด์แบบ A-Law มีวงจรกำหนดช่องสัญญาณภายใน ใช้กับข้อมูลพีซีเอ็มแบบอนุกรมที่มีอัตราเร็ว 2.048 Mbit/sec และทำการประชุมได้ 3 ช่องสัญญาณ นอกจากนี้จำนวนทรัพยากร CLB ภายในชิป FPGA เบอร์ XC 5210 ที่ใช้ในการออกแบบมี 296 CLB (คิดเป็น 91.35% ของจำนวน CLB ทั้งหมด) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อัลกอริทึมการใช้เสียงดังที่สุดเป็นหลักการในการประชุมทางโทรศัพท์ การอินทิเกรตกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเสียงจะใช้ช่วงเวลาทุก ๆ 8 msec ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสภาวิจัยแห่งชาติที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยและ คุณราชพร เขียนประสิทธิ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาในงานวิจัยเรื่องนี้

เอกสารอ้างอิง

กรกฎ วัฒนวิเชียร. 2539. การออกแบบและสร้างวงจรรวมขนาดใหญ่มากเชิงพาณิชย์สำหรับ PABX. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม,กรุงเทพฯ. 107 น.

วิจัย แซ่ตั้ง และ กรกฎ วัฒนวิเชียร. 2536. การออกแบบวงจรสลับคู่สายสัญญาณดิจิตอลเพื่อใช้กับชิป FPGA, น. 223-228 ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16. 25-26 พ.ย. 2536 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

ถวิล กิ่งทอง. 2535. เทคโนโลยีการส่งสัญญาณดิจิตอล. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ 78 น.

ถวิล พึ่งมา. 2535. ระบบชุมสายทางโทรศัพท์แบบดิจิตอล. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ 169 น.

ประสิทธิ ประพิณมงคลการ. 2540. หลักการระบบสื่อสาร. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ 383 น.

อานุภาพ บุญส่งศรีกุล และ กรกฎ วัฒนวิเชียร. 2539. การออกแบบชิปการประชุมทางโทรศัพท์โดยใช้ภาษาวีเอชดีแอล, น. EL - 4 - EL - 9. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19. 7 - 8 พ.ย. 2539 มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

อานุภาพ บุญส่งศรีกุล. 2541. การออกแบบชิปการประชุมทางโทรศัพท์โดยใช้ภาษาวีเอชดีแอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ 129 น.

Bellamy, J. 1991. Digital Telephony. 2nd ed., JOHN WILEY & SONS Inc., USA. 572 p.

Carlson, B. 1986. COMMUNICATION SYSTEMS. McGRAW-HILL Inc., USA. 686 p.

Malvino, A. and Leach, D. 1986. Digital Principles and Applications. McGRAW-HILL Inc., USA. 540 p.

Mazor, S. and Langstraat, P. 1992. A GUIDE TO VHDL. Kluwer Academic Publishers. NETHERLANDS. 271 p.

Mentor Graphics Corporation. 1992. AutoLogic VHDL Synthesis Guide. Mentor Graphics Corporation Wilsonville. Oregon. 274 p.

Mitel Semiconductor. 1989. MICROELECTRONIC DATA BOOK DON'T DESIGN WITH IT. Mitel Semiconductor, Canada.

Motorola Semiconductor. 1989. Motorola Semiconductor Technical Data. Motorola Inc., USA.

Motorola Semiconductor, 1995, Motorola Semiconductor Technical Data. Motorola Inc., USA.

SGS Thomson Micro electronics, 1989, LINE CARD IC Databook 1st ed. SGS-THOMSON Microelectronics, Italy.

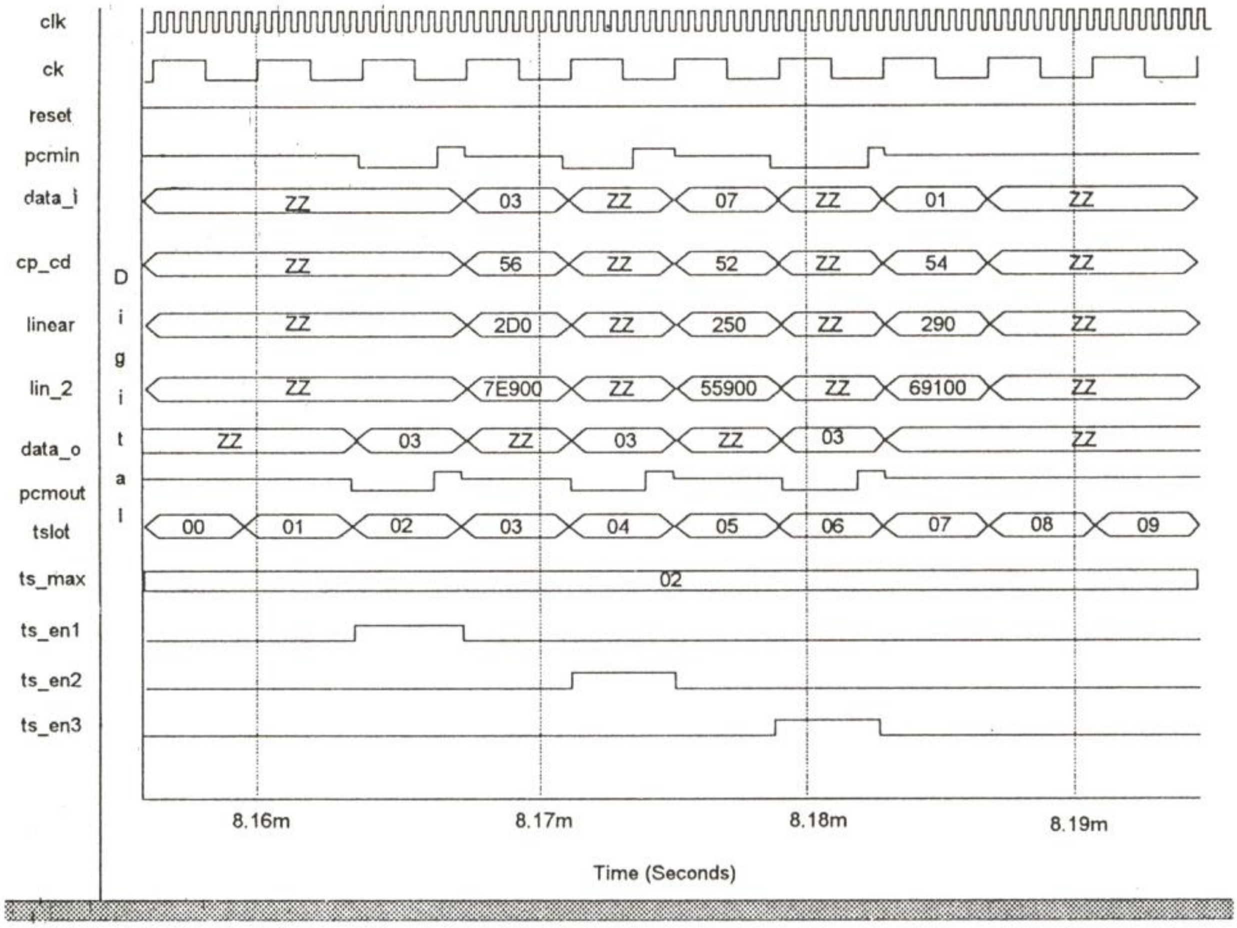
Tang, W. and Wattanavichean, K. 1995. Design of Conference - Digital Switching Matrix Chip Set for Communication System. Proceedings of Microelectronics and Information Technology, the 4th ASEAN Science and Technology Week, 28 - 30 Aug. 1995, Bangkok, pp. 51-56.

Viewlogic Inc. 1993A. VHDL Reference Manual and User's Guide. Viewlogic System Inc., Massachusetts. USA. 197 p.

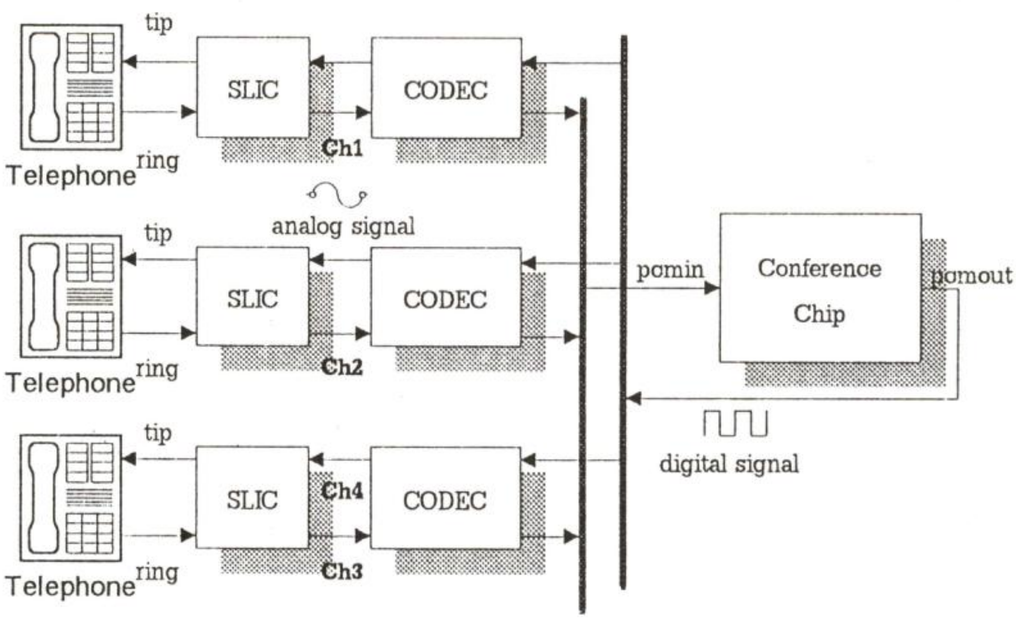
Viewlogic Inc. 1993B. Viewsynthesis user Guide. Viewlogic System Inc., Massachusetts. USA. 195 p.

Viewlogic Inc. 1993C. Viewsim user Guide. Viewlogic System Inc., Massachusetts. USA. 188 p.

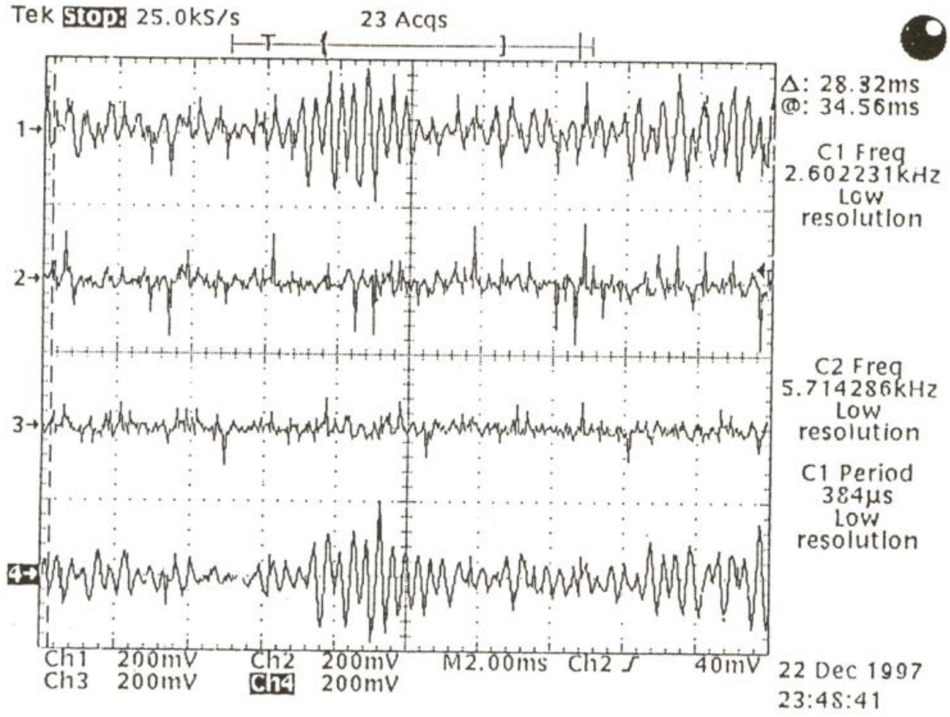
Xilinx Inc. 1995. Technical Data XC5200 Logic Cell Array Family. Xilinx Inc., USA. 75 p.



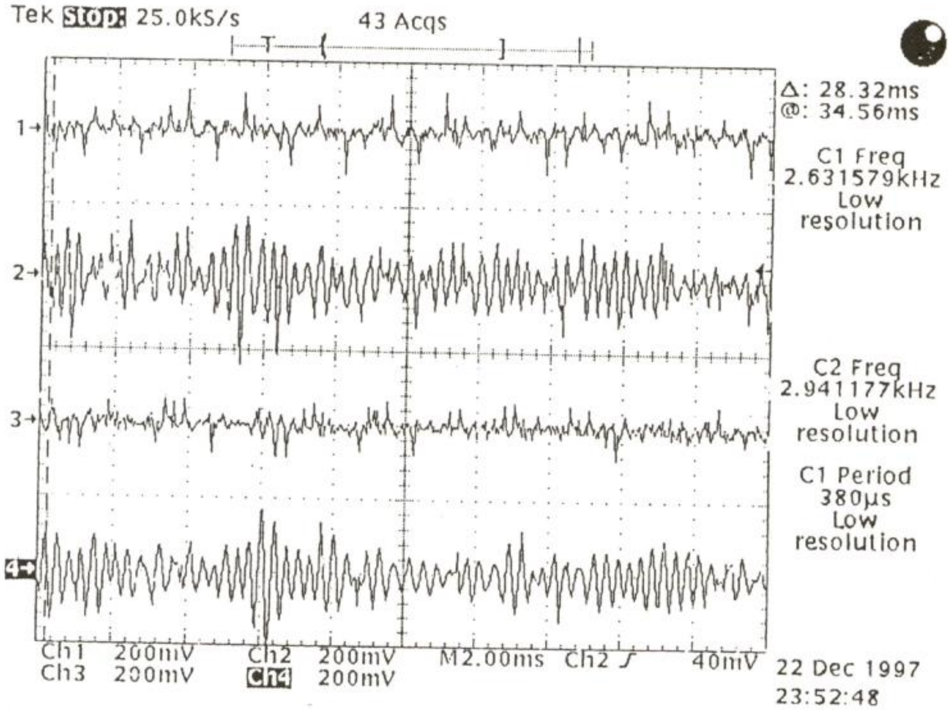
รูปที่ 3 แผนภาพเวลาของวงจรการประชุมทางโทรศัพท์ (เริ่มส่งข้อมูลชุดแรกคือคิดที่เวลาหลังจาก 8 msec)



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องต้นแบบการประชุมทางโทรศัพท์ในระบบพีซีเอ็มและชิป FPGA ที่โปรแกรมเป็นชิปการประชุมทางโทรศัพท์



รูปที่ 5 ระดับสัญญาณเสียงอินพุตที่ Ch1 Ch2 Ch3 และเอาต์พุตที่ Ch4 ที่เวลา T_1



รูปที่ 6 ระดับสัญญาณเสียงอินพุตที่ Ch1 Ch2 Ch3 และเอาต์พุตที่ Ch4 ที่เวลา T_2