

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



191036

รหัสโครงการวิจัย SUT7-709-52-24-45



รายงานการวิจัย

เครื่องควบคุมสัญญาณไฟจราจรโดยอัตโนมัติ (Automatic Traffic Light Controller)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

เครื่องควบคุมสัญญาณไฟจราจรโดยอัตโนมัติ (Automatic Traffic Light Controller)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ทองทา
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายปัญญา หันตุลา



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553-2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในการสนับสนุนงบประมาณวิจัย และขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มทส ในการช่วยเหลือออกแบบและติดตั้ง loop detector รูปทรงกลม ซึ่งน่าจะเป็นตัวแรกที่ทำการศึกษาติดตั้งและใช้งานจริงบนพื้นถนนในประเทศไทย

ผู้วิจัย

พฤษภาคม 2555

บทคัดย่อ

191036

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบ สร้าง และทดสอบ เครื่องควบคุมสัญญาณไฟจราจรโดยอัตโนมัติแบบกระตุ้นด้วยยานพาหนะ ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนคือ ส่วนตรวจจับยานพาหนะ (Vehicle Detector) และส่วนควบคุมสัญญาณไฟจราจร (Traffic Light Controller) ส่วนตรวจจับยานพาหนะเป็นชนิดลูปตีเทคเตอร์ โดยวงจรถูกกำเนิดความถี่จะสร้างคลื่นประมาณ 30-60 kHz ร่วมกับขดลวดที่ฝังอยู่ภายใต้พื้นถนน เมื่อมียานพาหนะมาอยู่เหนือขดลวด จะทำให้ความถี่ที่มันสร้างขึ้นเปลี่ยนแปลงไป การวัดความถี่ที่เปลี่ยนแปลงนี้กระทำโดยการนับโดยตรงด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ การตัดสินใจว่ามียานพาหนะปรากฏอยู่สามารถหาได้จากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความถี่ โดยสามารถกำหนดได้ 3 ระดับคือ 0.5% 1% และ 3% วงจรถูกกำเนิดความถี่ถูกแยกออกจากขดลวดด้วยหม้อแปลงความถี่เพื่อป้องกันการนำไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปวงจรภายใน ส่วนควบคุมสัญญาณไฟจราจรอาศัยข้อมูลจากส่วนตรวจจับมาตัดสินใจเพื่อควบคุมสัญญาณไฟตามที่ผู้ใช้งานกำหนด ส่วนควบคุมนี้มีส่วนป้องกันสัญญาณไฟเขียวทั้งสองด้านของทิศทางที่ขัดแย้งกัน โดยส่วนป้องกันนี้เป็นวงจรที่แยกต่างหากจากวงจรควบคุม ระบบทั้งหมดสามารถทำงานได้ดีภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง สามารถตรวจจับยานพาหนะขนาดเล็ก เช่น รถจักรยานยนต์ที่ความเร็ว 0.5% ได้

Abstract

191036

This research presents design, build and test an automatic traffic light controller system. The system consists of two parts; vehicle detector and traffic light controller. The vehicle detector is a loop detector type. The oscillator circuit with the loop under the traffic lane creates frequency between 30-60 kHz. When a vehicle presents, the frequency will be changed from the original. To make decision, threshold level in percentage of changing frequency of 0.5%, 1% and 3% are available. The oscillator circuit is separated from the loop detector by high frequency transformer. The traffic light controller uses information from the detector circuit to operate the traffic light accordingly to the users. The controller has separate circuit to prevent both green lights between two conflict directions. The overall systems can operate well under real situations and can detect small vehicle such as a motorcycle at 0.5% sensitivity.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คิดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสัญญาณไฟจราจร	3
2.2 คุณลักษณะของผู้ใช้รถใช้ถนน	6
2.2.1 ระยะเวลาการรับรู้และตอบสนอง (Perception and reaction time)	6
2.2.2 การมองเห็นและการขับชี่	7
2.2.3 คุณลักษณะอื่นๆ ของผู้ขับชี่	9
2.3 คุณลักษณะของยานพาหนะ	9
2.3.1 รูปร่างยานพาหนะมาตรฐาน (Design Vehicles)	9
2.3.2 อัตราการเร่งของยานพาหนะ	10
2.3.3 การชะลอตัวของยานพาหนะ	11
2.3.4 คุณลักษณะในการขับเคลื่อน	12
2.3.5 ตัวอย่างการคำนวณระยะทางการรับรู้และตอบสนอง และระยะทางการชะลอความเร็ว	13
2.4 ทฤษฎีการวิเคราะห์การออกแบบสัญญาณไฟจราจร	14
2.4.1 รอบเวลาสัญญาณไฟ (Signal Cycle)	14
2.4.2 เวลาล่าช้าของการเริ่มต้นและสุดท้าย (Start and End Lag Time)	14
2.4.3 การสูญเสียเวลาของการเคลื่อนที่ (Movement Lost Time)	15
2.4.4 การเคลื่อนที่วิกฤต (Critical Movement)	15
2.4.5 เวลาสูญเสียเวลาของทางแยก (Intersection Lost Time)	16
2.5 ทฤษฎีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของทางแยกที่ควบคุมด้วย สัญญาณไฟ	16
2.5.1 การพิจารณาการเคลื่อนที่ (Movement Consideration)	16

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.5.2 ความล่าช้า (Delay)	17
2.6 ระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจร	17
2.7 องค์ประกอบของเครื่องควบคุมไฟจราจร	20
2.8 ระบบตัวตรวจวัด (Detectors)	22
2.9 วิวัฒนาการของระบบตรวจวัดยานพาหนะ	25
2.9.1 อุปกรณ์ตรวจวัดการจราจรที่ติดตั้งอยู่บนหรือใต้ผิวทาง (In-roadway sensors)	26
2.9.2 อุปกรณ์ตรวจวัดการจราจรที่ติดตั้งอยู่เหนือผิวทาง (Over-roadway sensors)	30
2.9.3 เทคโนโลยีการตรวจวัดการจราจรที่ใช้ในประเทศไทย	37
2.10 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7	38
2.10.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 Philips LCP2148	38
2.10.2 ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์	43
2.10.3 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7	45
2.10.4 การต่อ GPIO เป็นเอาต์พุต	52
2.10.5 อินเทอร์รัปต์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7	58
2.10.6 การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับ UART0	66
บทที่ 3 การออกแบบระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจร	72
3.1 ส่วนของการออกแบบฮาร์ดแวร์ (Hardware) ของส่วนควบคุมสัญญาณไฟจราจร (Controller)	73
3.1.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 LPC2148	75
3.1.2 วงจรเชื่อมต่อตัวตรวจจับยานพาหนะ (Detector Socket)	76
3.1.3 วงจรแสดงผล (Display)	78
3.1.4 วงจรป้องกัน (Protection Circuit)	79
3.1.5 วงจรควบคุมการเปิดและปิดสัญญาณไฟจราจร (Driver 220 VAC)	84
3.1.6 ออกแบบวงจรรวมของส่วนควบคุมสัญญาณไฟจราจร	86
3.2 ส่วนของการออกแบบซอฟต์แวร์ (Software) ของส่วนควบคุมสัญญาณไฟจราจร (Controller)	88
3.3 ส่วนของการออกแบบฮาร์ดแวร์ตัวตรวจจับยานพาหนะ (Detector)	100
3.3.1 ตัวกำเนิดสัญญาณ (Oscillator)	100
3.3.2 ลูปเหนี่ยวนำ (Loop Detector)	103
3.3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 LPC2148	105
3.3.3 ออกแบบวงจรรวมของตัวตรวจจับยานพาหนะ	107

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.4 ส่วนของการออกแบบซอฟต์แวร์ตัวตรวจจับยานพาหนะ (Detector)	108
บทที่ 4 การใช้งานและผลการทดสอบ	114
4.1 การทดสอบความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงที่เชื่อมต่อกับลูปเหนี่ยวนำ	117
4.2 การทดสอบวงจรกำเนิดความถี่ในห้องปฏิบัติการ	119
4.3 การทดสอบโปรแกรมนับความถี่สำหรับตรวจวัดยานพาหนะกับเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ	120
4.4 การใช้งานตัวตรวจวัดยานพาหนะ (Detector)	123
4.5 การทดสอบการตรวจวัดยานพาหนะ	126
4.6 การใช้งานตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจร (Controller)	137
4.7 การทดสอบตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจร (Controller)	137
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	138
บรรณานุกรม	140
ภาคผนวก	141
ประวัติผู้วิจัย	168

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
ตารางที่ 2.1	ขนาดของยานพาหนะมาตรฐานที่ใช้สำหรับออกแบบ โดย AASHTO	10
ตารางที่ 2.2	อัตราการเร่งยานพาหนะแต่ละประเภท	10
ตารางที่ 2.3	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการลื่นไถลที่ใช้ในการออกแบบ	12
ตารางที่ 2.4	แสดงข้อดี-ข้อเสียของระบบ VA และ ATC	18
ตารางที่ 2.5	PLL Register	47
ตารางที่ 2.6	PLLCFG Register	48
ตารางที่ 2.7	PLLCON Register	48
ตารางที่ 2.8	ค่าแต่ละบิตของรีจิสเตอร์ PLLSTAT	49
ตารางที่ 2.9	โหมดการทำงานของวงจรPLL	49
ตารางที่ 2.10	ค่าแต่ละบิตของรีจิสเตอร์ VPBDIV	50
ตารางที่ 2.11	MAM Register	50
ตารางที่ 2.12	การกำหนดค่าให้กับ MAMCR Register	51
ตารางที่ 2.13	การกำหนดค่าให้กับ MAMTIM Register	51
ตารางที่ 2.14	รีจิสเตอร์ PINSELO, PINSEL1, PINSEL2	52
ตารางที่ 2.15	ค่าประจำบิตของรีจิสเตอร์ PINSELO	52
ตารางที่ 2.16	ค่าประจำบิตของรีจิสเตอร์ PINSEL1	54
ตารางที่ 2.17	ค่าประจำบิตของรีจิสเตอร์ PINSEL2	55
ตารางที่ 2.18	ชื่อและแอดเดรสของรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม GPIO	55
ตารางที่ 2.19	แหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปต์ทั้ง 32 ตัว	58
ตารางที่ 2.20	รีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการอินเตอร์รัปต์	60
ตารางที่ 2.21	รีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการอินเตอร์รัปต์จากภายนอก	63
ตารางที่ 2.22	ค่าประจำบิตของรีจิสเตอร์ EXTINT	63
ตารางที่ 2.23	ค่าประจำบิตของรีจิสเตอร์ EXTMODE	64
ตารางที่ 2.24	ค่าประจำบิตของรีจิสเตอร์ EXTPOLAR	65
ตารางที่ 2.25	ค่าประจำบิตของรีจิสเตอร์ EXTPILAR	66
ตารางที่ 2.26	รีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับ UART0	67
ตารางที่ 2.27	ค่าประจำบิตของรีจิสเตอร์ UART0 Line Control Register (UOLCR)	68
ตารางที่ 2.28	แสดงค่าประจำบิตของ UART0 Line Status Register (UOLSR)	69
ตารางที่ 3.1	LED แสดงสถานะการทำงานและการเชื่อมต่อพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์	78
ตารางที่ 3.2	แสดงสถานะการเชื่อมต่อพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์	79
ตารางที่ 3.3	ตารางแสดงการทำงานของ RS Flip flop	83
ตารางที่ 3.4	ผลการทดสอบเมื่อทำการปรับสวิตช์	101
ตารางที่ 3.5	การตั้งค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Sensitivity)	113
ตารางที่ 4.1	ความถี่ของตัวตรวจวัดยานพาหนะ	123

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 4.2	ความไวสำหรับตรวจวัดยานพาหนะ	124
ตารางที่ 4.3	ตารางแสดงผลการตรวจวัดประเภทรถยนต์ส่วนบุคคล	136
ตารางที่ 4.4	ตารางแสดงผลการตรวจวัดประเภทรถจักรยานยนต์	136
ตารางที่ 4.5	สรุปผลการตรวจวัดยานพาหนะ	136

สารบัญภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1	10
รูปที่ 2.2	15
รูปที่ 2.3	16
รูปที่ 2.4	21
รูปที่ 2.5	22
รูปที่ 2.6	23
รูปที่ 2.7	24
รูปที่ 2.8	24
รูปที่ 2.9	25
รูปที่ 2.10	25
รูปที่ 2.11	26
รูปที่ 2.12	27
รูปที่ 2.13	27
รูปที่ 2.14	28
รูปที่ 2.15	29
รูปที่ 2.16	30
รูปที่ 2.17	31
รูปที่ 2.18	32
รูปที่ 2.19	33
รูปที่ 2.20	33
รูปที่ 2.21	33
รูปที่ 2.22	34
รูปที่ 2.23	36
รูปที่ 2.24	37
รูปที่ 2.25	39
รูปที่ 2.26	41
รูปที่ 2.27	42
รูปที่ 2.28	44
รูปที่ 2.29	46
รูปที่ 2.30	30
รูปที่ 3.1	72
รูปที่ 3.2	74
รูปที่ 3.3	74
รูปที่ 3.4	75
รูปที่ 3.5	76

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 3.6 การออกแบบวงจรแปลงระดับสัญญาณ	76
รูปที่ 3.7 วงจรเชื่อมต่อตัวตรวจจับยานพาหนะ (Detector Socket)	77
รูปที่ 3.8 การเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 LPC2148 และตัวตรวจจับยานพาหนะ	78
รูปที่ 3.9 วงจรแสดงผล (Display)	79
รูปที่ 3.10 วงจรป้องกัน (Protection Circuit)	80
รูปที่ 3.11 ออกแบบวงจรสำหรับตรวจสอบสัญญาณไฟจราจร	80
รูปที่ 3.12 วงจรตรวจสอบสัญญาณไฟจราจร	81
รูปที่ 3.13 วงจรอินพุตของวงจรป้องกันการเกิดสัญญาณไฟเขียว 2 ทิศทาง	82
รูปที่ 3.14 การออกแบบวงจรดิจิทัล	82
รูปที่ 3.15 วงจรควบคุมการเปิดและปิดแหล่งจ่ายไฟ	84
รูปที่ 3.16 วงจรควบคุมการเปิดและปิดสัญญาณไฟจราจร	84
รูปที่ 3.17 ลักษณะการวางตำแหน่งของอุปกรณ์ของบอร์ดควบคุมสัญญาณไฟจราจร	86
รูปที่ 3.18 ลักษณะการวางตำแหน่งของอุปกรณ์วงจรควบคุมการเปิดและปิดสัญญาณไฟจราจร	87
รูปที่ 3.19 ลักษณะแยกการจราจรที่ติดตั้งระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจร	88
รูปที่ 3.20 รูปแบบการทำงานของฟังก์ชันการทำงานหลัก (Main Function)	89
รูปที่ 3.21 การทำงานของ Main Function	90
รูปที่ 3.22 การทำงานของ Set Time Wait Function	91
รูปที่ 3.23 การทำงานของ Check Loop Present Function	92
รูปที่ 3.24 การทำงานของ Present Loop Function	94
รูปที่ 3.25 ฟังก์ชันตรวจสอบตัวตรวจจับยานพาหนะ (Check Detector Function)	95
รูปที่ 3.26 การทำงานของ Absent Loop Function	96
รูปที่ 3.27 การทำงานของ Change Cross to Main Function	97
รูปที่ 3.28 การทำงานของตัวตรวจจับยานพาหนะ (Detector)	99
รูปที่ 3.29 ตัวตรวจจับยานพาหนะ (Detector)	100
รูปที่ 3.30 วงจรกำเนิดสัญญาณ	101
รูปที่ 3.31 วงจรกำเนิดสัญญาณ (Oscillator)	102
รูปที่ 3.32 การต่อลูปเหนี่ยวนำกับวงจรกำเนิดความถี่โดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า	102
รูปที่ 3.33 รูปแบบของขดลวดแบบต่าง ๆ	103
รูปที่ 3.34 การติดตั้งลูปเหนี่ยวนำ	103
รูปที่ 3.35 การติดตั้งลูปเหนี่ยวนำที่พื้นถนน	104
รูปที่ 3.36 การเชื่อมต่อวงจรกำเนิดความถี่กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 LPC218	105
รูปที่ 3.37 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 LPC218 กับวงจรภายนอก	106
รูปที่ 3.38 ลักษณะการวางตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆ ของบอร์ดตรวจจับยานพาหนะ	107

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 3.39 การทำงานของตัวตรวจจับยานพาหนะ	108
รูปที่ 3.40 วิธีการนับสัญญาณในช่วงเวลา 1 วินาที	108
รูปที่ 3.41 สัญญาณ Pulse ที่เข้ามา Logic1 และ Logic0	109
รูปที่ 3.42 สัญญาณ Pulse ที่จับได้ในช่วงเวลา 100 ms	109
รูปที่ 3.43 การทำงานของ Main Function ตัวตรวจจับยานพาหนะ	110
รูปที่ 3.44 การทำงานของ Check Present Function	112
รูปที่ 4.1 ระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรแบบกึ่งอัตโนมัติ	114
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายดาวเทียมแยกการจราจรที่ใช้ทดสอบ	115
รูปที่ 4.3 แยกการจราจรที่ใช้ทดสอบ (1)	115
รูปที่ 4.4 แยกการจราจรที่ใช้ทดสอบ (2)	115
รูปที่ 4.5 ตัวควบคุมสัญญาณไฟจราจรที่ติดตั้งตรงบริเวณแยกการจราจร	116
รูปที่ 4.6 การทดลองหม้อแปลงด้วยความถี่ต่างๆ	117
รูปที่ 4.7 กราฟความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลง (1:3)	117
รูปที่ 4.8 กราฟความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลง (1:1) 150 รอบ	118
รูปที่ 4.9 กราฟความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลง (1:1) 100 รอบ	118
รูปที่ 4.10 วงจรกำเนิดความถี่และหม้อแปลง	119
รูปที่ 4.11 วัดความถี่โดยใช้ Oscilloscope	119
รูปที่ 4.12 อุปกรณ์การทดสอบโปรแกรมนับความถี่สำหรับตรวจวัดยานพาหนะ ในห้องปฏิบัติการ	120
รูปที่ 4.13 เครื่อง Multi Function Generator สร้างความถี่ที่ 50 kHz	120
รูปที่ 4.14 เครื่อง Universal Counter อ่านความถี่ได้ที่ 50 kHz	121
รูปที่ 4.15 Oscilloscope วัดความถี่ได้ 50 kHz	121
รูปที่ 4.16 โปรแกรมนับความถี่สำหรับตรวจวัดยานพาหนะอ่านความถี่ที่สร้างมาจากเครื่อง Multi Function Generator ที่ 50 kHz	122
รูปที่ 4.17 ลูบเหนียวนำที่ติดตั้งที่พื้นถนน	123
รูปที่ 4.18 Dip Switch สำหรับเลือกความถี่ของตัวตรวจวัดยานพาหนะ	124
รูปที่ 4.19 Dip Switch สำหรับเลือกความไวของตัวตรวจวัดยานพาหนะ	125
รูปที่ 4.20 แสดงตัวอย่างของการแสดงผลความถี่ของตัวตรวจวัดยานพาหนะผ่านทางโปรแกรม Hyper Terminal	125
รูปที่ 4.21 อุปกรณ์สำหรับทดสอบตรวจจับยานพาหนะ	126
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบวัดความถี่ 50 kHz ในขณะที่ไม่มียานพาหนะ	127
รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบวัดความถี่ 32 kHz ในขณะที่ไม่มียานพาหนะ	127
รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบวัดความถี่ 26 kHz ในขณะที่ไม่มียานพาหนะ	128
รูปที่ 4.25 ลักษณะยานพาหนะขนาดเล็กอยู่บนลูบเหนียวนำ	129

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 4.26 ลักษณะยานพาหนะประเภทรถยนต์ส่วนบุคคลอยู่บนลู่วิ่ง	129
รูปที่ 4.27 ความถี่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีรถยนต์ส่วนบุคคลอยู่ที่ลู่วิ่ง (50 kHz)	130
รูปที่ 4.28 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อมีรถยนต์ส่วนบุคคลอยู่ที่ลู่วิ่ง (50 kHz)	130
รูปที่ 4.29 ความถี่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีรถจักรยานยนต์อยู่ที่ลู่วิ่ง (50 kHz)	131
รูปที่ 4.30 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อมีรถจักรยานยนต์อยู่ที่ลู่วิ่ง (50 kHz)	131
รูปที่ 4.31 ความถี่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีรถยนต์ส่วนบุคคลอยู่ที่ลู่วิ่ง (32 kHz)	132
รูปที่ 4.32 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อมีรถยนต์ส่วนบุคคลอยู่ที่ลู่วิ่ง (32 kHz)	132
รูปที่ 4.33 ความถี่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีรถยนต์ส่วนบุคคลอยู่ที่ลู่วิ่ง (32 kHz)	133
รูปที่ 4.34 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อมีรถยนต์ส่วนบุคคลอยู่ที่ลู่วิ่ง (32 kHz)	133
รูปที่ 4.35 ความถี่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีรถยนต์ส่วนบุคคลอยู่ที่ลู่วิ่ง (26 kHz)	136
รูปที่ 4.36 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อมีรถยนต์ส่วนบุคคลอยู่ที่ลู่วิ่ง (26 kHz)	136
รูปที่ 4.37 ความถี่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีรถจักรยานยนต์อยู่ที่ลู่วิ่ง (26 kHz)	135
รูปที่ 4.38 อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อมีรถยนต์ส่วนบุคคลอยู่ที่ลู่วิ่ง (26 kHz)	135