SUT7-709-52-12-37

249834

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

249834

รายงานการวิจัย

การออกแบบและวิเคราะห์การรับส่งสัญญาณอิมพัลส์สำหรับวงจรภาคส่วนหน้าของระบบสื่อสารไร้สายอัลตร้าไวด์แบนด์

DESIGN AND ANALYSIS IMPULSE SIGNAL TRANSCEIVER OF RF FRONT END FOR ULTRA WIDEBAND WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM

ได้รับทุนอุดหนุนจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

SUT7-709-52-12-37

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249834

รายงานการวิจัย

การออกแบบและวิเคราะห์การรับส่งสัญญาณอิมพัลส์สำหรับวงจรภาคส่วนหน้าของระบบสื่อสารไร้สายอัลตร้าไวด์แบนด์

DESIGN AND ANALYSIS IMPULSE SIGNAL TRANSCEIVER OF RF FRONT END FOR ULTRA WIDEBAND WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภา

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551

- ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินการได้และได้รับผลสำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และขอขอบคุณ ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์ ซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษา ให้ข้อมูลและให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย คุณประพล จาระตะคุ วิศวกรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ และคุณธนเสฏฐ์ ทศดีกรพัฒน์ ที่ช่วยทำการวัดทดสอบงานวิจัยรวมถึงการจัดรูปเล่มรายงานการวิจัยครั้งนี้

ชาญชัย ทองโสภา

พฤศจิกายน 2554

บทคัดย่อ

249834

ความต้องการสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายความถี่แถบกว้างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในอนาคตจะมีระบบการสื่อสารไร้สายที่ให้บริการได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การสื่อสารที่เป็นมัลติมีเดียและการเข้าถึงจุดให้บริการด้วยความเร็วสูง ซึ่งปัจจุบันนี้เทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญสำหรับการสื่อสารไมโครเวฟ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีราคาถูกและใช้กำลังงานน้อยมาก ที่ผ่านมาเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาใช้ในระบบของเรดาร์ และทางการทหาร โดยเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์มีวิธีการรับส่งสัญญาณในรูปแบบของพัลส์ ต่อมามีการพัฒนาที่จะนำการรับส่งสัญญาณแบบพัลส์นี้มาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์มากขึ้น จึงได้มีการพัฒนาให้เป็นระบบการสื่อสารไร้สายอัลตร้าไวด์แบนด์ ภายใต้มาตรฐานของ IEEE เนื่องจากเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์เป็นการส่งข้อมูลในลักษณะของพัลส์แคบ ๆ ผ่านย่านความถี่แถบกว้าง จึงทำให้เทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์มีการใช้ความหนาแน่นกำลังงานเชิงสเปกตรัมของสัญญาณในระดับต่ำ และสามารถถ่ายโอนข้อมูลในระยะใกล้ ๆ ด้วยอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงมากโดยไม่มีการรบกวนกับระบบสื่อสารไร้สายแบบอื่น และด้วยความสามารถที่เหนือกว่าเทคโนโลยีเดิมอย่าง เช่น Wi-Fi และ Bluetooth ซึ่งเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารภายในอาคารบ้านเรือน หรือสำนักงานที่ต้องการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน จึงทำให้เทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์นี้ได้รับความสนใจสูงมากในปัจจุบัน จากความสำคัญของปัญหาทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจในการออกแบบและวิเคราะห์การรับส่งสัญญาณพัลส์สำหรับวงจรภาคส่วนหน้าของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนได้แก่ การออกแบบสายอากาศแบนด์กว้างแบบแถวลำดับ และการออกแบบวงจรเครื่องรับส่งภาคส่วนหน้า โดยทำการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณโมโนไซเคิลพัลส์ด้วยชิปวงจรรวม พร้อมทั้งวิเคราะห์และทดสอบผลการทำงานจริงของระบบ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสายอากาศมีแบนด์วิดท์ 7.5 GHz และมีการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ต่าง ๆ ภายในห้องปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไร้คลื่นสะท้อน ซึ่งระบบที่ได้มีขนาดเล็ก ราคาถูก สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายอัลตร้าไวด์แบนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Abstract

249834

The demands for broadband services by wireless communication systems are rapidly growing. Future wireless systems will provide various services such as broadband multimedia and high speed access. Nowadays an ultra wideband radio technology has become an important topic for microwave communication because of its low cost and low power consumption. Ultra wideband (UWB) technology had been using for radar system and military applications in the past and it utilizes a short period pulse to convey information. Nowadays, it is available for use in commercial section, and ultra wideband wireless communication is standardized by IEEE. Since UWB technology transmits narrow pulses, the transmitting signal occupies very large bandwidth. Hence, the UWB signal spectrum density is usually lower than most wireless systems. This feature allows UWB for used in short rang with high data rate, because UWB does not interfere with other wireless communication systems. Moreover, this technology is more capability than Wi-Fi and Bluetooth. So, the application is suitable for inside building such a habitation or office that would like to connect electronic equipments altogether. Because of this, the researcher is interested to design and analysis impulse signal transceiver of RF front end for ultra wideband communication system. This research investigates two sub-systems of UWB system, i.e., wideband array antennas and transmitter front end. A monocycle pulse generator is implemented in MMIC and tested. A bow type antenna is designed, simulated and tested. The bandwidth of antenna is measured to be 7.5 GHz. The antenna's radiation patterns are also measured in an anechoic chamber for various frequencies. And, the result shows the system is small size, not expensive and able to efficiency apply for ultra wideband wireless communication systems.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญรูป ..... ซ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย 4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
1.6 ปริทัศน์วรรณกรรม 5
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบและวิเคราะห์การรับส่งสัญญาณพัลส์สำหรับระบบสื่อสารไร้สายอัลตร้าไวด์แบนด์ 9
2.1 กล่าวนำ 9
2.2 ความเป็นมาของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ 9
2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ 11
2.3.1 นิยามและข้อกำหนดเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ 11
2.3.2 ข้อเปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์กับเทคโนโลยีแบนด์แคบ 14
2.3.3 ข้อดีของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ 15
2.3.4 การประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ 16
2.4 โครงสร้างของระบบการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ 17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสาร อัลตร้าไวด์แบนด์ 20
2.5.1 การวิเคราะห์ในโดเมนเวลา 21
2.5.2 การวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ 23
2.6 ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์โดยพื้นฐานสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสาร อัลตร้าไวด์แบนด์ 26
2.6.1 เกาส์เซียนพัลส์ 26
2.6.2 เกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์ 28
2.6.3 เกาส์เซียนดับเลตพัลส์ 30
2.7 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศ 31
2.7.1 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ 32
2.7.2 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน 34
2.7.3 อัตราขยาย 40
2.7.4 ความกว้างแถบ 40
2.8 สายอากาศแบบไมโครสตริปแพตช์ 41
2.9 โครงสร้างและทฤษฎีของการกำเนิดพัลส์ 46
2.10 สรุป 50
3 สายอากาศไมโครสตริปแพตช์แบนด์กว้างต้นแบบสำหรับ 52
ระบบสื่อสารไร้สายอัลตร้าไวด์แบนด์ 52
3.1 กล่าวนำ 52
3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพตช์ต้นแบบ สำหรับเทคโนโลยี 52
อัลตร้าไวด์แบนด์ 52
3.2.1 พื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป 52
3.2.2 ความเป็นมาของการออกแบบสายอากาศสำหรับเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ 54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3 การศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปอัลตร้าไวด์แบนด์ต้นแบบ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป IE3D.....55

3.3 ผลการจำลองแบบ.....57

3.4 การสร้างสายอากาศต้นแบบ.....68

3.5 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ.....69

3.6 ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ.....72

3.7 ผลการทดลองวัดค่าอัตราการขยายของสายอากาศ.....73

3.8 ผลการทดลองวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ.....75

3.9 สรุป.....82

4 สายอากาศไมโครสตริปแพตช์แบนด์กว้างแบบแถวลำดับ และวงจรภาคส่วนหน้าสำหรับวิเคราะห์การรับส่งสัญญาณพัลส์ของระบบสื่อสารไร้สายอัลตร้าไวด์แบนด์.....83

4.1 กล่าวนำ.....83

4.2 การออกแบบและสร้างสายอากาศแบบแถวลำดับ.....84

4.3 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับ.....86

4.4 ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับ.....88

4.5 ผลการทดลองวัดค่าอัตราการขยายของสายอากาศ.....89

4.6 ผลการทดลองวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศแถวลำดับ....91

4.7 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์.....95

4.7.1 คุณลักษณะของวงจรกำเนิดพัลส์.....95

4.7.2 การออกแบบสายประวิงเวลาสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณโมโนไซเคิลพัลส์.....98

4.8 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์.....103

4.8.1 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์.....103

4.8.2 ผลการวัดและทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์.....104

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.9 สรุป 105
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 107
5.1 สรุปเนื้อหาของการวิจัย 107
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 109
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต 109
รายการอ้างอิง 111
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 113
ภาคผนวก ข รายละเอียดทางเทคนิคของสายอากาศและวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ 126
ประวัติผู้วิจัย 128

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 เปรียบเทียบลักษณะสัญญาณการสื่อสารระหว่างเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์และเทคโนโลยีที่ใช้แถบความถี่แคบทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ 11

2.2 ช่วงสเปกตรัมของความถี่เปรียบเทียบกับระดับพลังงานสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ภายในอาคาร 12

2.3 ช่วงสเปกตรัมของความถี่เปรียบเทียบกับระดับพลังงานสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ภายนอกอาคาร 12

2.4 ความหนาแน่นพลังงานเชิงสเปกตรัมของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการสื่อสารรูปแบบอื่น 13

2.5 เปรียบเทียบรูปแบบสัญญาณการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์และเทคโนโลยีแบบแถบความถี่แคบทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ 15

2.6 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องรับส่งสัญญาณสำหรับเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ 18

2.7 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องรับสัญญาณสำหรับเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ 18

2.8 รูปแบบสัญญาณพัลส์ลักษณะต่าง ๆ ของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ 19

2.9 รูปแบบสัญญาณพัลส์ของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ที่แพร่กระจายจากเครื่องรับส่งผ่านช่องทางการสื่อสารไปยังเครื่องรับ 20

2.10 ตัวอย่างของสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา 22

2.11 สัญญาณเกาส์เซียนพัลส์ที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เมื่อพิจารณาในโดเมนเวลา 27

2.12 สัญญาณเกาส์เซียนพัลส์ที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่ 27

2.13 สัญญาณเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เมื่อพิจารณาในโดเมนเวลา 29

2.14 สัญญาณเกาส์เซียนโมโนไซเคิลพัลส์สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่ 29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.15 สัญญาณเกาส์เซียนดับเลตพัลส์ที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ เมื่อพิจารณาในโดเมนเวลา 30

2.16 สัญญาณเกาส์เซียนดับเลตพัลส์ที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์ เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่ 31

2.17 แสดงระบบพิกัดที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายพลังงานของคลื่น 35

2.18 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นในระนาบสามมิติ และแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในระนาบสองมิติ 36

2.19 แบบรูปของสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว 37

2.20 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบมีทิศทาง โดยมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นหลักในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร 38

2.21 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศที่ต้องการพิจารณา 39

2.22 ลักษณะการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมและรูปวงกลม 42

2.23 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพตช์ 43

2.24 ตัวอย่างสายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก 45

2.25 กราฟคุณลักษณะของทัลเนลไดโอด 47

2.26 โครงสร้างพื้นฐานการกำเนิดพัลส์ด้วย SRD ไดโอด 49

3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปที่จำลองผลด้วยโปรแกรม IE3D 56

3.2 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ 57

3.3 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น 58

3.4 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด l_3 59

3.5 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด w_6 60

3.6 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด l 61

3.7 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ปรับขนาดได้อย่างเหมาะสม 62

3.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการจำลองผลของสายอากาศ 63

3.9 อัตราการขยายของสายสายอากาศที่ได้จากการจำลองผล 63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.10 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ 65
3.11 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ 67
3.12 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศต้นแบบ 69
3.13 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบ 71
3.14 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบ 71
3.15 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศที่ช่วงความถี่ต่าง ๆ 72
3.16 การเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ 73
3.17 การวัดอัตราการขยายของสายอากาศต้นแบบ 74
3.18 ผลการวัดอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ 74
3.19 การเตรียมเครื่องมือสำหรับวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศต้นแบบ 75
3.20 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศต้นแบบ 76
3.21 สายอากาศตัวส่งแบบไมโครสตริปไดโพล 77
3.22 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ 79
3.23 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ 81
4.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบแถวลำดับ 85
4.2 สายอากาศแบบแถวลำดับ 88
4.3 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบสายอากาศแถวลำดับ 88
4.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบสายอากาศแถวลำดับ 89
4.5 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศที่ช่วงความถี่ต่าง ๆ 88
4.6 การเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ 89
4.7 การวัดอัตราการขยายของสายอากาศแถวลำดับ 88
4.8 ผลการการวัดอัตราการขยายของสายอากาศแถวลำดับ 89
4.9 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับ 88
4.10 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า
และสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่าง ๆ 89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.11 โครงสร้างพื้นฐานการกำเนิดพัลส์ด้วยไดโอดฟื้นตัวแบบขั้นร่วมกับสายประวิงเวลา.....99
4.12 ลักษณะสัญญาณของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นจากวงจรพื้นฐานการกำเนิดพัลส์ด้วยไดโอดฟื้นตัวแบบขั้นร่วมกับสายประวิงเวลา.....100
4.13 แผนภาพบล็อกการกำเนิดสัญญาณโมโนไซเคิลพัลส์.....101
4.14 โครงสร้างการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ด้วยไดโอดฟื้นตัวแบบขั้นร่วมกับสายประวิงเวลา.....102
4.15 โครงสร้างของชุดวงจรกำเนิดสัญญาณโมโนไซเคิลพัลส์สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตร้าไวด์แบนด์.....103