

การออกแบบเอฟเฟกต์ฟัซซ์และโอเวอร์ไดรฟ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการ
ประมาณของ Bernstein สำหรับกีตาร์ไฟฟ้า

NON LINEAR EFFECTS OF FUZZ AND OVERDRIVE DESIGNED BY
APPROXIMATION OF BERNSTEIN POLYNOMIAL FOR ELECTRIC GUITARS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-230-007

การออกแบบเอฟเฟกต์ฟัซซ์และโอเวอร์ไดร์ฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการ
ประมาณของ Bernstein สำหรับกีตาร์ไฟฟ้า

NON LINEAR EFFECTS OF FUZZ AND OVERDRIVE DESIGNED BY
APPROXIMATION OF BERNSTEIN POLYNOMIAL FOR ELECTRIC GUITARS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NON LINEAR EFFECTS OF FUZZ AND OVERDRIVE DESIGNED BY
APPROXIMATION OF BERNSTEIN POLYNOMIAL FOR ELECTRIC GUITARS



SARUNYOO PALAKVANGSA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

KMITL-2018-EN-M-230-007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบเอฟเฟกต์ฟัซซ์และโอเวอร์ไดร์ฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการประมาณของ Bernstein สำหรับกีตาร์ไฟฟ้า

Thesis Title Non Linear Effects of Fuzz and Overdrive Designed by Approximation of Bernstein Polynomial for Electric Guitars

นักศึกษา นายศรัณยู ปาลกะวงศ์

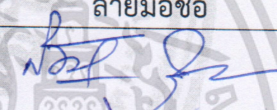
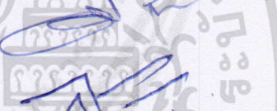
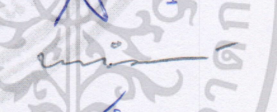
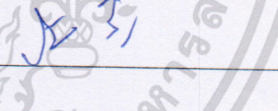
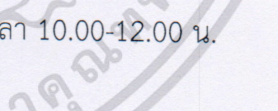
รหัสประจำตัว 57601298

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปิติเขต สุร์รักษา

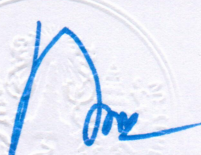
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-230-007

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ	อุดมทรรษากุล	
รศ.ดร.อรรณณสิทธิ์	เหล่าสกุล	
รศ.ดร.สุรพันธุ์	เอื้อไพบูลย์	
รศ.ดร.ชวลิต	เบญจางคประเสริฐ	
รศ.ดร.ปิติเขต	สุร์รักษา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 3 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา **ฉบับตีพิมพ์** คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้ง **วันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561** ใ้มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์	การออกแบบเอฟเฟกต์พีซซ์และโอเวอร์ไดรฟ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการประมาณของ Bernstein สำหรับกีตาร์ไฟฟ้า
นักศึกษา	นายศรัณยู ปาลกะวงษ์
รหัสประจำตัว	57601298
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ปิติเขต สุรักษา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบเอฟเฟกต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการประมาณของ Bernstein สำหรับกีตาร์ไฟฟ้า ในอดีตกีตาร์เอฟเฟกต์ถูกพัฒนาขึ้นมาในรูปแบบของวงจรไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นในรูปแบบฮาร์ดแวร์เท่านั้น และไม่สามารถปรับแต่งลักษณะของเสียงได้อย่างหลากหลาย ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอสมการไม่เป็นเชิงเส้นของ Bernstein ซึ่งสามารถนำมาใช้ปรับแต่งลักษณะเด่นของเสียงของกีตาร์ได้อย่างหลากหลายเช่น Blues Jazz Metal ฯลฯ โดยการปรับพารามิเตอร์ของสมการไม่เป็นเชิงเส้นของ Bernstein วิธีดังกล่าวนี้นอกจากจะใช้ออกแบบลักษณะเสียงของเสียงกีตาร์ได้หลายรูปแบบแล้ว แต่ยังสามารถใช้สำหรับพัฒนา ซอฟต์แวร์ (Software) หรือ แอปพลิเคชัน (Application) ซึ่งไม่มีความบิดเบือนของสัญญาณจากวงจรเอฟเฟกต์กีตาร์ (Guitar effect circuit) ที่เป็นดังเช่นรูปแบบที่ผ่านมา

Thesis	NON LINEAR EFFECTS OF FUZZ AND OVERDRIVE DESIGNED BY APPROXIMATION OF BERNSTEIN POLYNOMIAL FOR ELECTRIC GUITARS
Student	Mr. Sarunyoo Palakvangsa
Student ID.	57601298
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pitikhate Sooraksa

ABSTRACT

This thesis proposes nonlinear effects designed by approximation of Bernstein polynomial for electric guitars. Conventionally, guitar effects are developed on hardware circuits only and cannot adjust new characteristics of sound differently. Hence, this thesis presents an application of music instrument using the Bernstein polynomial, which can be adjusted some parameters in order to identify a dominant feature producing sound variety such as Blues, Jazz, Metal, etc. In addition, the proposed method can be applied to develop software or application without using distortion effects from the circuit.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ปิติเขต สุรักษา ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดลชัย สุขเจริญผล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมกันกับ รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ผศ. ดร. วันวิสา ชัชวงษ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางเกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ศรัณยู ปาลกะวงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.7 ข้อเสนอแนะ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 การประมวลผลของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้น.....	5
2.3 ชนิดวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณ.....	6
2.4 ทฤษฎีโพลีโนเมียลของ Bernstein.....	15
2.5 ทฤษฎีเส้นโค้งของ Bezier (Bezier Curve).....	18
2.6 ทฤษฎีเส้นโค้งของ Rational-Bezier (Rational-Bezier curves).....	22
2.7 สรุป.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	28
3.1 บทนำ.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.2 การคอนโวลูชัน.....	28
3.3 การประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณ ด้วยสมการโพลีโนเมียลของ Bernstein.....	33
3.4 สรุป.....	36
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	37
4.1 บทนำ.....	37
4.2 กราฟแสดงผลการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถรวจจับผลความบิดเบือน ของสัญญาณด้วยสมการเส้นโค้งของ Bezier.....	37
4.3 กราฟแสดงผลการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถรวจจับผลความบิดเบือน ของสัญญาณด้วยสมการเส้นโค้งของ Rational-Bezier.....	39
4.4 การประมาณวงจรถรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณในรูปแบบ เสียงต่างๆ.....	40
4.5 สรุป.....	43
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	50
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก ก.	54
ประวัติผู้เขียน	56

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางแสดงสมการที่ได้จากผลการคอนโวลูชัน.....	33
4.1 ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ปรับลักษณะใหม่ของเสียง.....	45



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณ	4
2.2 แสดงสัญญาณอินพุทและเอาต์พุท ซึ่งผ่านระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น	5
2.3 พืชซ์เอฟเฟกต์	6
2.4 โอเวอร์ไดรฟ์เอฟเฟกต์	7
2.5 ลักษณะของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของพืชซ์เอฟเฟกต์	9
2.6 ลักษณะของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของโอเวอร์ไดรฟ์เอฟเฟกต์	9
2.7 ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุทที่ผ่านสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของพืชซ์เอฟเฟกต์.....	10
2.8 ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุทที่ผ่านสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของโอเวอร์ไดรฟ์เอฟเฟกต์	11
2.9 ความถี่ฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณไซน์อินพุท.....	12
2.10 ความถี่ฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณไซน์ที่ผ่านผลกระทบชนิดพืชซ์.....	12
2.11 ความถี่ฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณไซน์ที่ผ่านผลกระทบชนิดโอเวอร์ไดรฟ์.....	12
2.12 การรวมกันของสัญญาณ.....	14
2.13 ความถี่ฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณที่รวมกัน.....	14
2.14 Sergei Natanovich Bernstein.....	15
2.15 สมการไม่เป็นเชิงเส้นของ Bernstein (Bernstein Polynomial).....	18
2.16 Pierre Bezier.....	19
2.17 เส้นโค้งที่มาจากสมการของ Bezier curves.....	20
2.18 เส้นโค้งจากสมการ Rational-Bezier curves.....	24
3.1 สัญญาณสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียล.....	29
3.2 สัญญาณอินเวอร์สสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียล.....	29
3.3 สัญญาณสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียลที่ผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดพืชซ์.....	30
3.4 ผลการคอนโวลูชันระหว่างสัญญาณอินเวอร์สสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียลและ สัญญาณสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียลที่ผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดพืชซ์.....	31
3.5 สัญญาณสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียลที่ผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดโอเวอร์ไดรฟ์.....	31
3.6 ผลการคอนโวลูชันระหว่าง สัญญาณอินเวอร์สสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียลและ สัญญาณสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียลที่ผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดโอเวอร์ไดรฟ์.....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

4.1. การประมาณวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีซซ์ ด้วยสมการเส้นโค้งของ Bezier.....	38
4.2. การประมาณวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ ด้วยสมการเส้นโค้งของ Bezier.....	38
4.3. การประมาณวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีซซ์ ด้วยสมการเส้นโค้งของ Rational-Bezier.....	39
4.4. การประมาณวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ ด้วยสมการเส้นโค้งของ Rational-Bezier.....	40
4.5. สัญญาณกีตาร์ไฟฟ้า.....	41
4.6. ความถี่ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณกีตาร์ไฟฟ้า.....	41
4.7. สัญญาณเสียง Blue.....	42
4.8. สัญญาณเสียง Pop rock.....	42
4.9. สัญญาณเสียง Metal.....	43
4.10. สัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของพีซซ์เอฟเฟกต์สำหรับเสียง Blue.....	43
4.11. สัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของพีซซ์เอฟเฟกต์สำหรับเสียง Pop rock.....	44
4.12. สัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของพีซซ์เอฟเฟกต์สำหรับเสียง Metal.....	44
4.13. การประมาณสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของพีซซ์เอฟเฟกต์สำหรับเสียง Blue.....	45
4.14. การประมาณสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของพีซซ์เอฟเฟกต์สำหรับเสียง Pop rock.....	46
4.15. การประมาณสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของพีซซ์เอฟเฟกต์สำหรับเสียง Metal.....	46
4.16. การประมาณสัญญาณกีตาร์ที่ผ่านพีซซ์เอฟเฟกต์สำหรับเสียง Blue	47
4.17. การประมาณสัญญาณกีตาร์ที่ผ่านพีซซ์เอฟเฟกต์สำหรับเสียง Pop rocker	47
4.17. การประมาณสัญญาณกีตาร์ที่ผ่านพีซซ์เอฟเฟกต์สำหรับเสียง Metal.....	48
4.19. ภาพรวมการเปรียบเทียบการประมาณสัญญาณของพีซซ์เอฟเฟกต์.....	49
4.20. ภาพรวมการเปรียบเทียบการประมาณสัญญาณของโอเวอร์ไดรฟ์เอฟเฟกต์.....	49
ก.1. บล็อกไดอะแกรมการคอนโวลูชันสำหรับวิเคราะห์วงจรมันไม่เป็นเชิงเส้น.....	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับเครื่องดนตรีมีอยู่หลากหลาย และถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่องเพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้งาน รวมถึงการออกแบบลักษณะของเสียงในแบบต่าง ๆ เพื่อความต้องการของนักดนตรี โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวที่นำมาใช้ในการศึกษานั้นคือวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับดัดแปลงสัญญาณเสียงของกีตาร์เพื่อให้เกิดลักษณะเสียงในแบบต่าง ๆ เช่น การบิดเบือน (Distortion), รีเวิร์บ (Reverb), คอรัส (Chorus), ฯลฯ โดยนักดนตรีนิยมนำมาใช้กับแนวดนตรีที่หลากหลาย เช่น Blues, Jazz, Rock ฯลฯ แต่วงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ที่ออกแบบโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีข้อเสียบางประการ นั่นคือต้องใช้ต้นทุนสูงในการผลิตเนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการผลิตอยู่มาก ต่อเอฟเฟกต์กีตาร์หนึ่งหน่วย และอีกประการหนึ่งคือในวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์หนึ่งชนิด ไม่สามารถปรับแต่งลักษณะเด่นหรือลักษณะใหม่ๆ ของเสียงชนิดนั้นได้อย่างหลากหลาย เหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้นักดนตรีหรือนักกีตาร์ต้องพกพาวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์จำนวนมากในการเดินทางไปขึ้นแสดงบนเวทีหรือเข้าสตูดิโอ (Studio) ในการบันทึกเพลงในแต่ละครั้ง และเพื่อที่จะปรับแต่งลักษณะของเสียงใหม่ๆ อยู่ตลอดเวลา

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอสมการไม่เป็นเชิงเส้นของ Bernstein ซึ่งสามารถนำมาใช้ปรับแต่งลักษณะเด่นของเสียงของกีตาร์ได้อย่างหลากหลายโดยการปรับพารามิเตอร์ของสมการไม่เป็นเชิงเส้นของ Bernstein วิธีดังกล่าวนี้นอกจากจะใช้ออกแบบลักษณะเสียงของเสียงกีตาร์ได้หลายรูปแบบแล้ว แต่ยังสามารถใช้สำหรับพัฒนา ซอฟต์แวร์ (Software) หรือ แอปพลิเคชัน (Application) ได้อีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อหาจำนวนอันดับของวงจรไม่เป็นเชิงเส้นในวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์
- 2) เพื่อประมาณลักษณะของวงจรไม่เป็นเชิงเส้นในวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์

- 3) เพื่อออกแบบเอฟเฟกต์กีตาร์ที่สามารถปรับแต่งลักษณะเด่นของสัญญาณโพลีโนเมียลได้
- 4) เพื่อนำงานวิจัยนี้ไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ชนิดอื่น เช่น ซอฟต์แวร์ หรือแอปพลิเคชัน เป็นต้น

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

- 1) สามารถศึกษาการทำงานของวงจรไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยทฤษฎีการตัดยอด (Clipping Signal)
- 2) สามารถประมาณลักษณะของวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ได้ด้วยวิธีของ Bernstein
- 3) สามารถออกแบบวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ที่ปรับแต่งได้ด้วยวิธีการปรับพารามิเตอร์ของ Bernstein
- 4) สามารถนำวิธีของ Bernstein ไปพัฒนาต่อกับอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ ได้ เช่น ซอฟต์แวร์ เป็นต้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ ด้วยวิธีการประมาณของ Bernstein ซึ่งทำให้สามารถปรับแต่งลักษณะเด่นของเสียงของกีตาร์ได้อย่างหลากหลาย โดยการปรับพารามิเตอร์ของสมการไม่เป็นเชิงเส้นของ Bernstein และใช้โครงสร้างของอนุกรมไวเทอราในการกรองความถี่ในแต่ละลำดับ เพื่อนำไปใช้ปรับอัตราส่วนของฮาร์โมนิก ทำให้สามารถปรับแต่งลักษณะของเสียงได้เพิ่มเติมอีกด้วย นอกจากนี้วิธีดังกล่าวสามารถนำมาพัฒนาบนเครื่องมือในแบบอื่นได้ เช่น ซอฟต์แวร์ หรือ แอปพลิเคชัน

1.5 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ประมาณลักษณะของวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์
- 2) ออกแบบเสียงวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ที่ปรับแต่งได้ด้วยวิธีการปรับพารามิเตอร์ของ Bernstein

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

การศึกษาวิจัยนั้น เริ่มต้นจากการนำวงจรของเอฟเฟคกีตาร์มาวิเคราะห์ลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร จากนั้นได้นำโพลีโนเมียลของBernsteinมาประมาณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นวงจรของเอฟเฟคกีตาร์ โดยใช้วิธีการปรับพารามิเตอร์ให้มีความหลากหลาย หลังจากนั้นได้นำอนุกรมของโวลเทอร่าเพื่อใช้สำหรับกรองความถี่ในแต่ละลำดับ เพื่อนำไปใช้ปรับอัตราส่วนของฮาร์มอนิก ทำให้สามารถปรับแต่งลักษณะของเสียงได้

1.7 ข้อเสนอแนะ

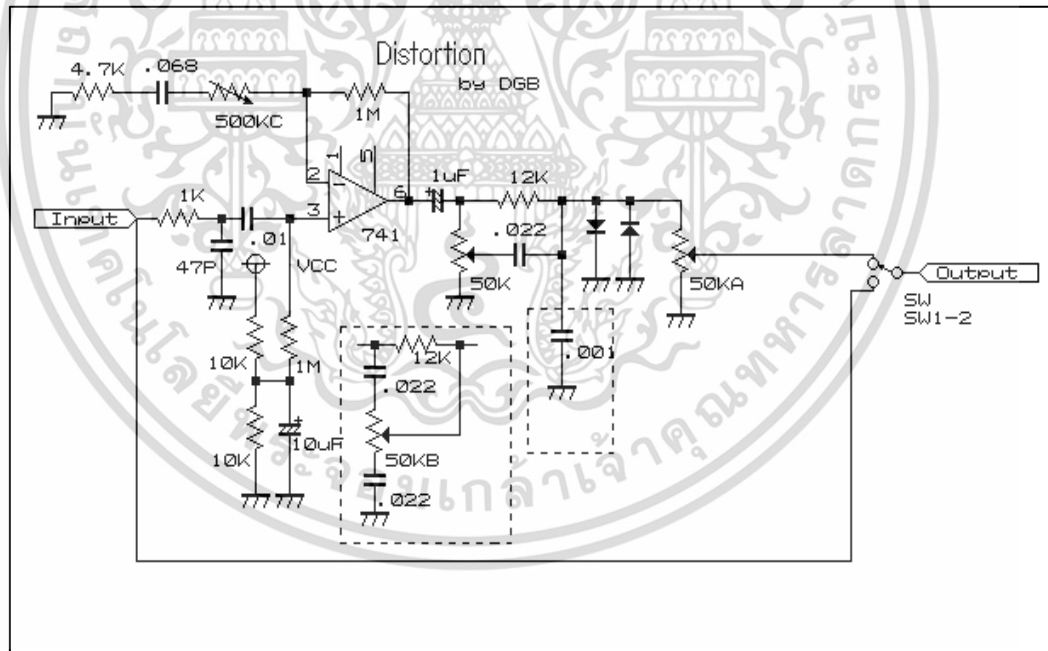
- 1) สามารถนำวิธีการประมาณของ Bernstein มาประมาณวงจรไม่เป็นเชิงเส้นในรูปแบบอื่น ๆ ได้นอกจากวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ เช่น วงจรกรองความถี่ หรือ อีควอลไลเซอร์ (Equalizer)
- 2) สามารถนำวิธีการปรับแต่งสัญญาณของ Bernstein มาปรับพารามิเตอร์ เพื่อปรับแต่งสัญญาณของวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ในรูปแบบอื่น ๆ ได้ เช่น Delay, Chorus, Reverb ฯลฯ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

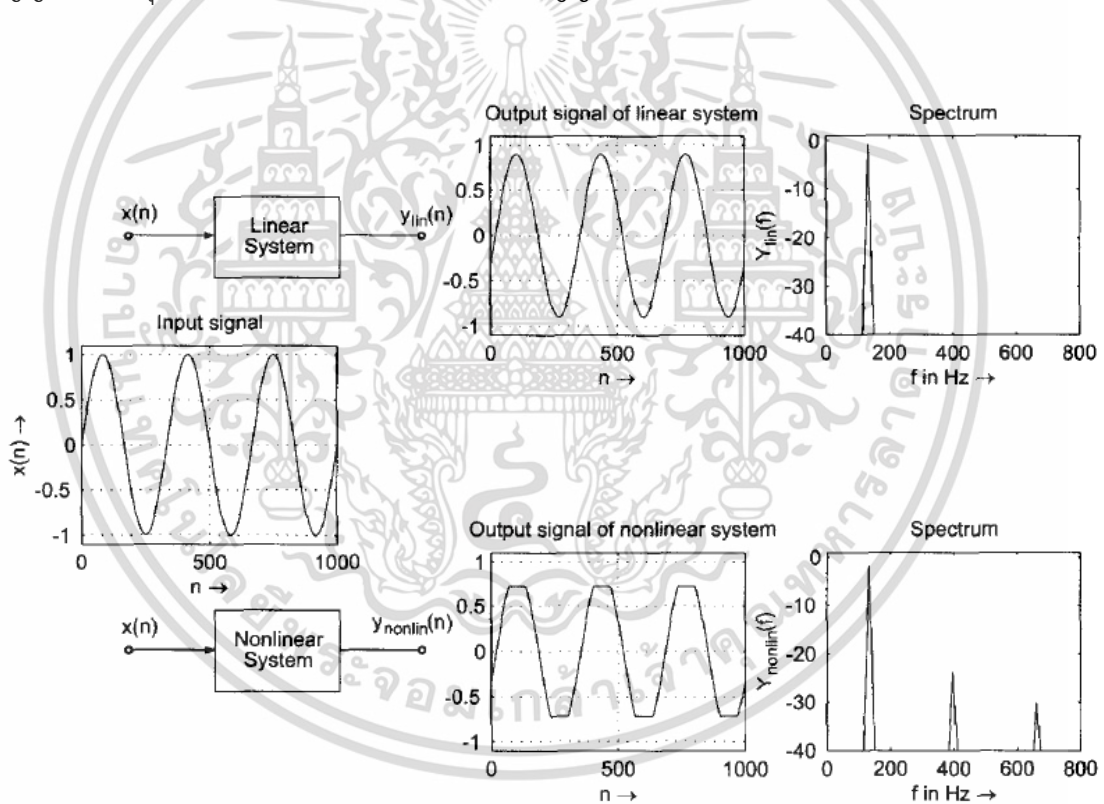
ในปัจจุบันวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์นั้น มีใช้กันอยู่แพร่หลายทำหน้าทีดัดแปลงสัญญาณกีตาร์ในรูปสัญญาณไฟฟ้าโดยอาศัยลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจร โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นเอฟเฟกต์กีตาร์ที่อยู่ในรูปวงจร โดยกลุ่มเอฟเฟกต์ที่นำมาพิจารณาในบทความนี้คือ วงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณ (Distortion Effect circuit) ดังรูปที่ 2.1. ซึ่งการบิดเบือนในเสียงดนตรีที่จะกล่าวสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ผ่านวงจรไม่เป็นเชิงเส้น โดยการเกิดการบิดเบือนส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการตัดยอดสัญญาณ (Clipping signal) ซึ่งการตัดยอด เป็นกระบวนการไม่เป็นเชิงเส้นแบบหนึ่งและทำให้ความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมขึ้นอยู่กับอันดับของความไม่เป็นเชิงเส้นการตัดยอดเป็นการทำให้รูปแบบสัญญาณมีการบิดเบือนไปจากเดิม



รูปที่ 2.1. วงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณ [20]

2.2 การประมวลผลของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Processing)

การประมวลผลของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นคือส่วนหนึ่งของขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณ หรือ อุปกรณ์การประมวลผลสัญญาณซึ่งเป็นอนาล็อก (Analog) หรือ ดิจิตอล (Digital) ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักในการให้สัญญาณเอาต์พุต เมื่อสัญญาณอินพุตคือสัญญาณชนิดคลื่นไซน์ซึ่งทราบแอมพลิจูดและความถี่แน่นอน ระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear system) จะให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณไซน์อีกครั้ง ซึ่งแอมพลิจูดจะได้รับการเปลี่ยนแปลงไปโดยการตอบสนองแอมกนิจูด (Magnitude response) ของฟังก์ชันส่งผ่าน (Transfer function) และการตอบสนองเฟส (Phase response) ได้รับการแก้ไขโดยเฟสของฟังก์ชันส่งผ่านดังรูปที่ 2.2 แสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งผ่านระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น จากภาพมีการแสดงฮาร์มอนิกของสัญญาณที่ผ่านระบบที่เป็นเชิงเส้นและระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยเรียกสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านระบบไม่เป็นเชิงเส้นว่าเป็นสัญญาณการบิดเบือน [17]



รูปที่ 2.2 แสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งผ่านระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น [17]

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการประมาณระบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นระบบที่ทำให้สัญญาณอินพุตถูกตัดยอดเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้รับการบิดเบือนนั่นเอง ในทางดนตรีนั้นระบบไม่เป็นเชิงเส้นเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่ากล่องผลกระทบ (Effect box) โดยลักษณะของระบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือกล่องผลกระทบที่นำมาใช้เป็นแบบในการประมาณนั้นจะกล่าวในหัวข้อลำดับถัดไป

2.3 ชนิดวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณ

ชนิดของวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณ ที่นำมาเสนอในบทนี้มี 2 ประเภทคือ ชนิดฟัซซ์ (Fuzz) แสดงดังรูปที่ 2.3. และ โอเวอร์ไดร์ฟ (Overdrive) แสดงดังรูป 2.4. ซึ่งเป็นวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณที่นิยมใช้เนื่องจากสัญญาณที่ผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณนั้นได้รับความบิดเบือนอย่างเห็นได้ชัด และวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณทั้งสองประเภคนั้นยังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในดนตรีประเภท Rock และ Metal

ปัจจุบัน ฟัซซ์ และ โอเวอร์ไดร์ฟ ผลิตออกมาในแบบของวงจรรอนาลอก โดยหลักการคือใช้ไดโอด (Diode) ในการตัดยอดสัญญาณอินพุตเพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณการบิดเบือน ดังที่แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งการบิดเบือนในเสียงดนตรีที่จะกล่าวสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ผ่านวงจรไม่เป็นเชิงเส้น โดยการเกิดการบิดเบือนส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการตัดยอดสัญญาณ ซึ่งการตัดยอดเป็นกระบวนการไม่เป็นเชิงเส้นแบบหนึ่งและทำให้ความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมขึ้นอยู่กับอันดับของความไม่เป็นเชิงเส้น การตัดยอดเป็นการทำให้รูปแบบสัญญาณมีการบิดเบือนไปจากเดิม



รูปที่ 2.3. ฟัซซ์เอฟเฟกต์ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4. โอเวอร์ไดร์ฟเอฟเฟกต์ [19]

จากวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดพีซซ์ ได้ทำการวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุตที่ได้รับการบิดเบือนจากวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดพีซซ์ [18] พบว่าสมการของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้รับการบิดเบือนจากวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดพีซซ์นั้นเป็นไปตามสมการที่ 2.1 โดยลักษณะของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นชนิดพีซซ์นั้นพบว่าแอมพลิจูดของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปจากสัญญาณไซน์อินพุตเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้รับการตัดยอดสัญญาณ และการตอบสนองเฟสพบว่ามีค่ามากขึ้นจากการตอบสนองเฟสในสัญญาณไซน์อินพุต

สมการไม่เป็นเชิงเส้นของชนิดพีซซ์ แสดงดังสมการที่ 2.1

$$f(x) = \frac{x}{|x|} \cdot (1 - e^{-\frac{x^2}{|x|}}) \quad (2.1)$$

x = สัญญาณอินพุต

สัญญาณอินพุตนั้น นอกจากเป็นสัญญาณของกีตาร์ได้แล้ว ยังสามารถใช้กับสัญญาณจากเครื่องดนตรีชนิดอื่น ๆ ได้ เช่น เบส (Bass), คีย์บอร์ด (Keyboard) และสัญญาณจากเครื่องดนตรีชนิดอื่น ๆ ที่ต้องการจะบิดเบือนด้วยสมการไม่เป็นเชิงเส้นของชนิดพีซซ์ แต่ในบทนี้ใช้สัญญาณไซน์เป็นสัญญาณอินพุตเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตได้อย่างชัดเจน

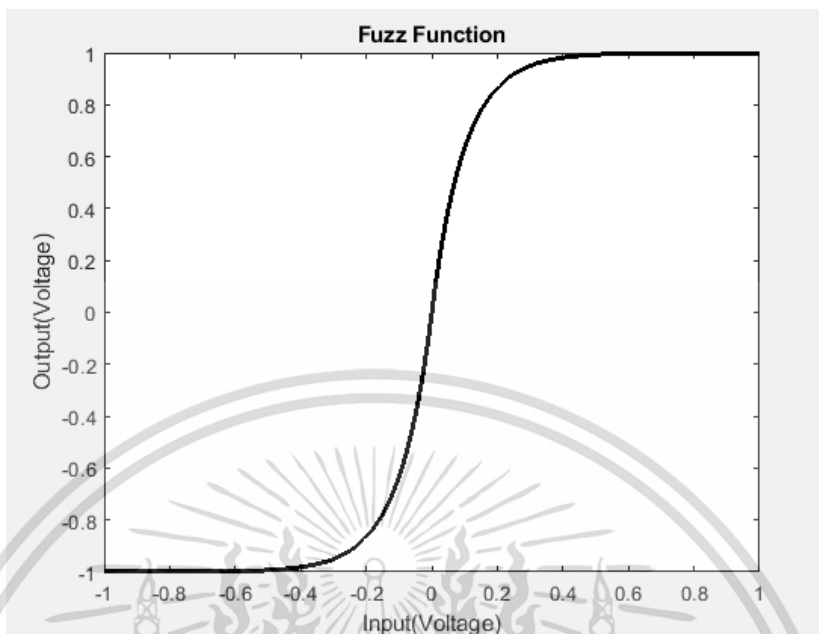
จากวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ ได้ทำการวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุทที่ได้รับ การบิดเบือนจากวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ [19] พบว่าสมการของสัญญาณเอาต์ พุทที่ได้รับการบิดเบือนจากวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ นั้นเป็นไปตามสมการที่ 2.2 โดยลักษณะของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นชนิดโอเวอร์ไดรฟ์นั้นพบว่าแอมพลิจูดของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไป จากสัญญาณไซน์อินพุทเป็นสัญญาณเอาต์พุทที่ได้รับการตัดยอดสัญญาณ และการตอบสนองเฟสพบว่ามี ความชันน้อยกว่าชนิดพีซซ์เอฟเฟกต์

สมการไม่เป็นเชิงเส้นของโอเวอร์ไดรฟ์เอฟเฟกต์ แสดงดังสมการที่ 2.2.

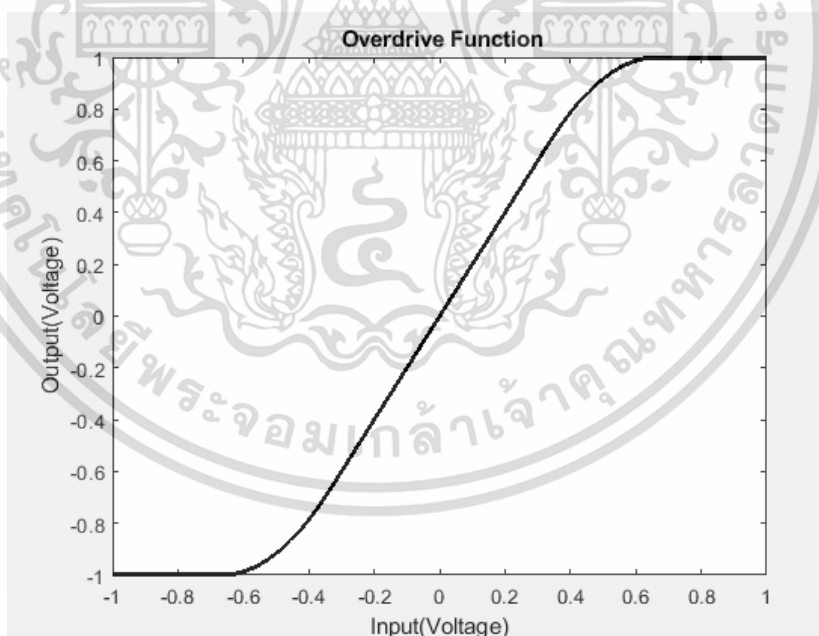
$$f(x) = \begin{cases} 2x & \text{for } 0 \leq x \leq \frac{1}{3} \\ \frac{3-(2-3x)^2}{3} & \text{for } \frac{1}{3} \leq x \leq \frac{2}{3} \\ 1 & \text{for } \frac{2}{3} \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (2.2)$$

x = สัญญาณอินพุท

จากสมการไม่เป็นเชิงเส้นของโอเวอร์ไดรฟ์ ดังสมการที่ 2.2 จะให้รูปแบบสัญญาณเอาต์พุทที่ออกมาอยู่ในรูปของซอฟต์แวร์คลิปปิง (Soft clipping) สังเกตได้จากการตอบสนองเฟสของสัญญาณเอาต์พุทนั้นมีความชันน้อย ส่งผลกระทบให้สัญญาณถูกตัดยอดได้น้อยกว่าสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความชันของการตอบสนองเฟสสูงอย่างเช่นสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นชนิดพีซซ์ จากสมการสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) เป็น $\frac{1}{3}$ ของสัญญาณอินพุท ทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุทซึ่งมาจากสัญญาณอินพุท ที่ถูกขยายเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ถ้าค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) เป็น $\frac{1}{3}$ ของสัญญาณอินพุท ถึง $\frac{2}{3}$ ของสัญญาณอินพุท สัญญาณอินพุทจะเข้าสมการ $\frac{3-(2-3x)^2}{3}$ เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุทอยู่ในส่วนของการตอบสนองเฟสและสุดท้าย ถ้าค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) เป็น $\frac{2}{3}$ ของสัญญาณอินพุท ถึง 1 ทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุทมีค่าเป็น 1 นั่นคือส่วนของแอมพลิจูดที่ถูกตัดยอดสัญญาณดังที่ได้อธิบายในเรื่องของการตัดยอดสัญญาณดังที่กล่าวไปแล้ว โดยสมการไม่เป็นเชิงเส้นทั้ง พีซซ์ และโอเวอร์ไดรฟ์นั้น อยู่ในรูปของสมการฟังก์ชันสถิต (Static function) ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น สามารถนำสมการมาใช้แสดงลักษณะของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของพีซซ์ แสดงดังรูปที่ 2.5. และโอเวอร์ไดรฟ์ แสดงดังรูปที่ 2.6.



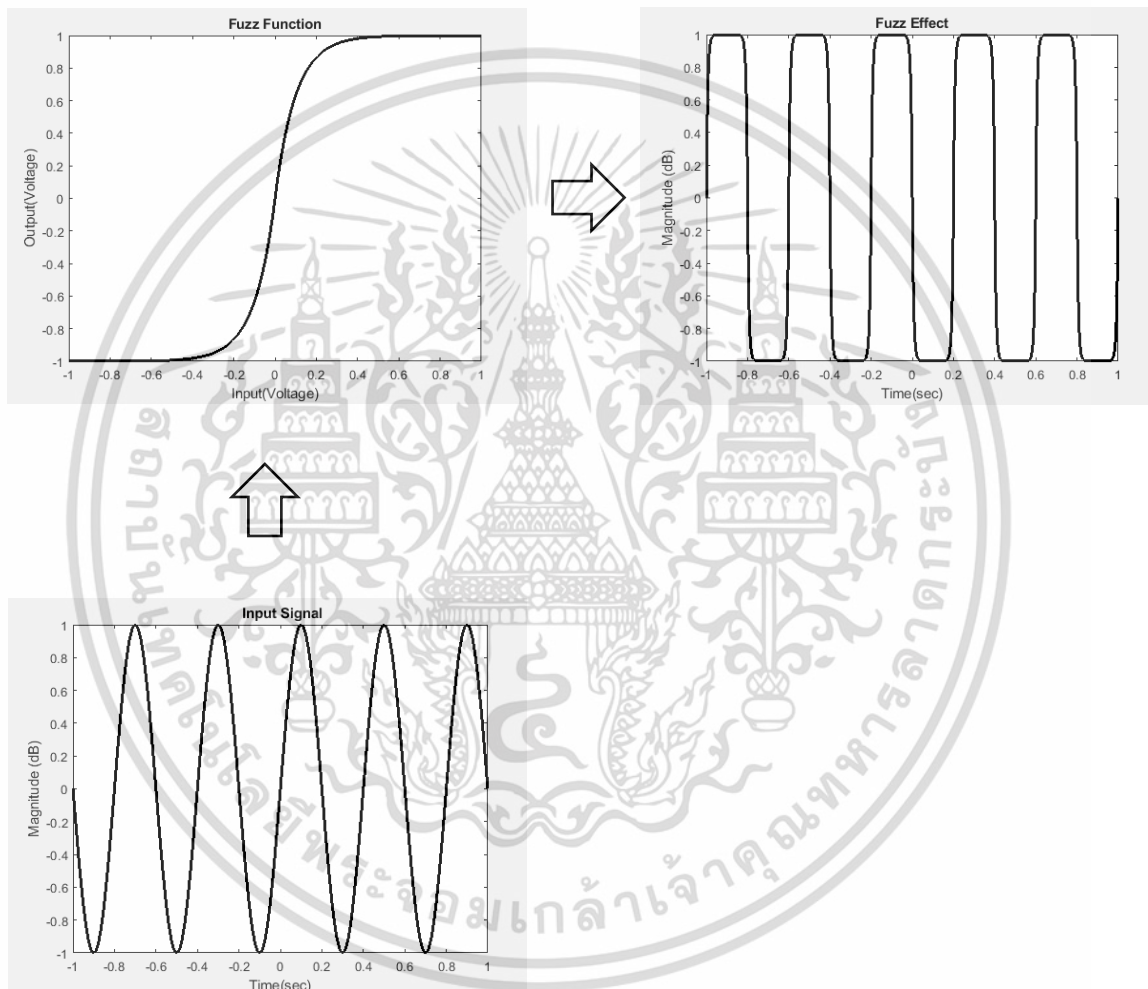
รูปที่ 2.5. ลักษณะของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของฟัซซีเอฟเฟกต์



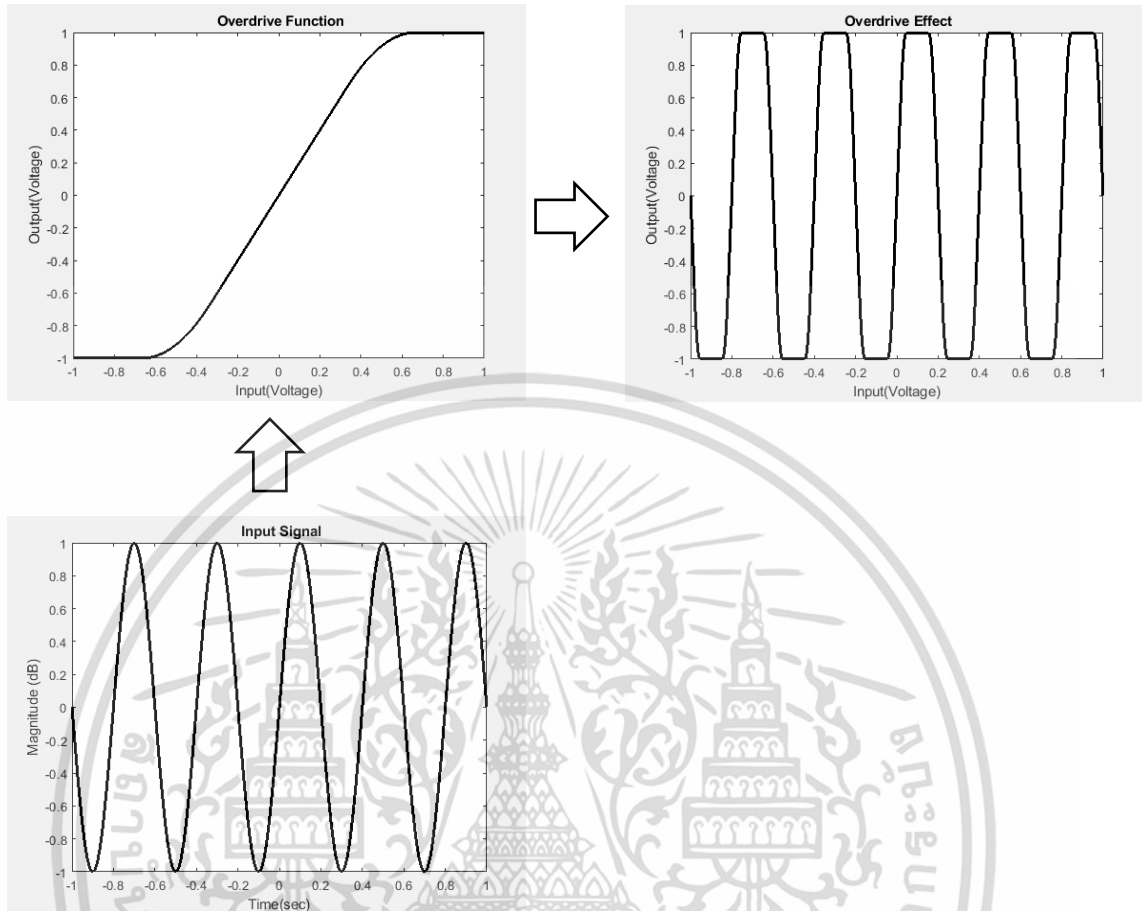
รูปที่ 2.6. ลักษณะของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของโอเวอร์ไดร์ฟเอฟเฟกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นได้นำสัญญาณไซน์อินพุต (Input Signal) ผ่านสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของเอฟเฟกต์ฮาร์ตทังสองชนิด เพื่อวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุต (Output Signal) ซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตนั้นเปลี่ยนแปลงไปจากอินพุตอย่างสิ้นเชิง เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตนั้นได้ถูกตัดยอดสัญญาณหรือเรียกว่าเป็นสัญญาณการบิดเบือน ดังรูปที่ 2.7. และ 2.8.

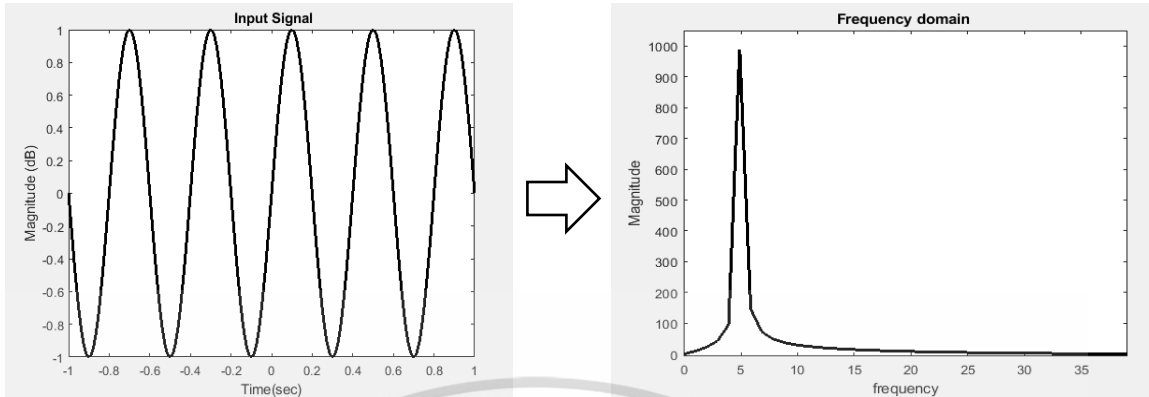


รูปที่ 2.7. ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของฟัซซีเอฟเฟกต์

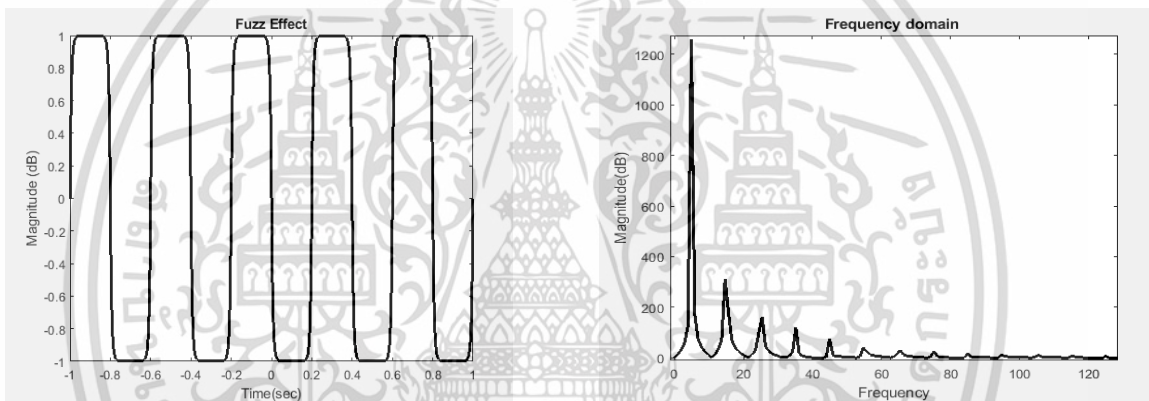


รูปที่ 2.8. ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของโอเวอร์ไดรฟ์เฟคต์

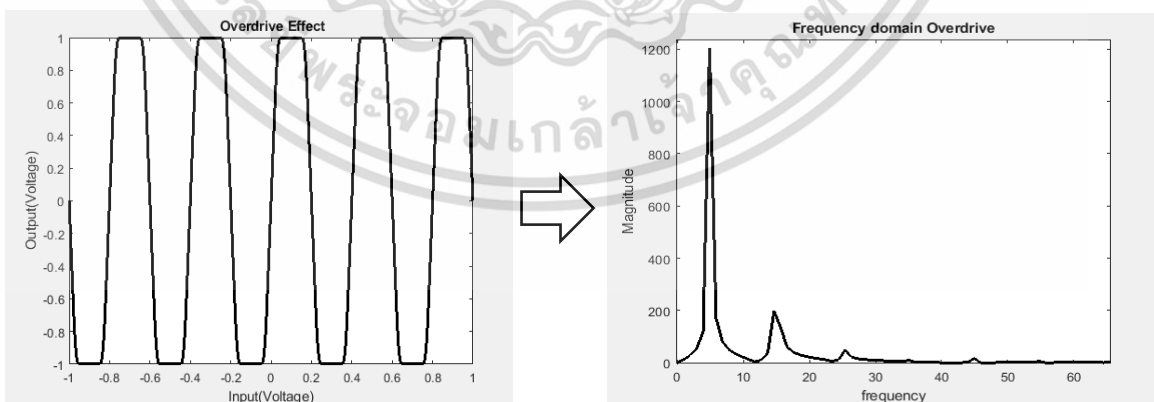
จากรูปที่ 2.7. และ 2.8. พบว่า สัญญาณเอาต์พุตนั้นถูกตัดยอดสัญญาณเนื่องจากสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของพีซซ์ และ โอเวอร์ไดรฟ์ ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติเฉพาะของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของของพีซซ์ และ โอเวอร์ไดรฟ์ สามารถทำได้โดยการตรวจสอบจากจำนวนฮาร์มอนิก (Number of Harmonics) และ อัตราส่วนระหว่างฮาร์มอนิก (Ratio of Harmonics) โดยความถี่ฮาร์มอนิกของสัญญาณไซน์อินพุตแสดงดังรูปที่ 2.9. ความถี่ฮาร์มอนิกของสัญญาณไซน์ที่ผ่านสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของของพีซซ์แสดงดังรูปที่ 2.10. และความถี่ฮาร์มอนิกของสัญญาณไซน์ที่ผ่านสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของโอเวอร์ไดรฟ์เฟคต์แสดงดังรูปที่ 2.11.



รูปที่ 2.9. ความถี่ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณไซน์อินพุต



รูปที่ 2.10. ความถี่ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณไซน์ที่ผ่านผลกระทบชนิดฟิซซ์



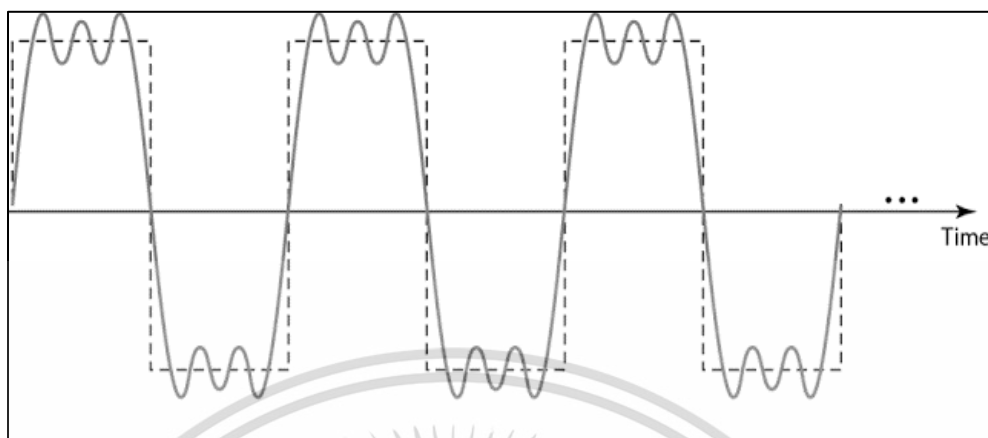
รูปที่ 2.11. ความถี่ฮาร์โมนิคของสัญญาณไซน์ที่ผ่านผลกระทบชนิดโอเวอร์ไดร์ฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

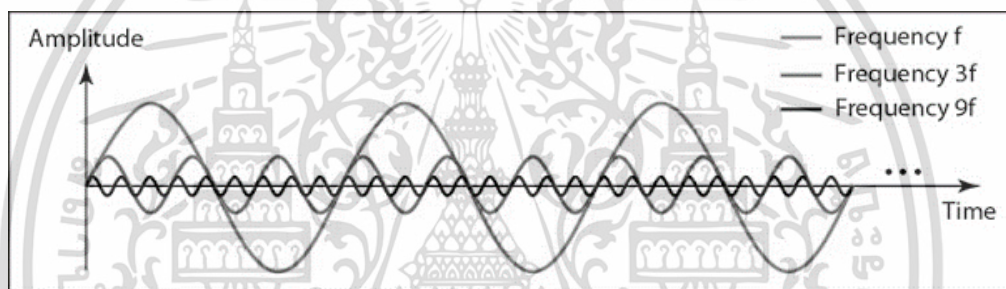
จาก รูปที่ 2.9 ความถี่ฮาร์โมนิกของสัญญาณไซน์อินพุท จะพบว่าความถี่ที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุด อยู่ที่ 10 Hz หรือเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าฮาร์โมนิกหลัก (Fundamental harmonic) โดยความถี่ฮาร์โมนิกของสัญญาณไซน์อินพุทอยู่ในรูปของโดเมนความถี่ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับโดเมนเวลา นั้นหมายความว่าสามารถหาค่าความถี่ของสัญญาณไซน์อินพุทในรูปของสัญญาณอนาลอกที่ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของโดเมนเวลาได้จากความถี่ฮาร์โมนิกในรูปของโดเมนความถี่นั่นเอง

การหาความถี่ของสัญญาณอนาลอกในรูปแบบของโดเมนเวลาเพื่อที่จะแสดงอยู่ในรูปของโดเมนความถี่นั้น สามารถทำได้โดยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) [11] ผู้ที่คิดค้นทฤษฎี FFT คือนักคณิตศาสตร์ 2 ท่านชื่อ Cooley และ Tukey โดยทั้งสองท่านได้เผยแพร่ทฤษฎี FFT นี้ในปี ค.ศ. 1965 ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถแปลงโดเมนความถี่เป็นโดเมนเวลาได้ โดยวิธีการนั้นอยู่บนโครงสร้างของ Discrete Fourier Transform (DFT) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณไร้คาบเพื่อที่จะคำนวณหาค่าเสปกตรัมทั้งหมดของสัญญาณ แต่ข้อเสียของ DFT นั้นคือการคำนวณหาค่าเสปกตรัมของสัญญาณนั้นอาจใช้เวลามากจนเกินไป เนื่องจากสัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Discrete Signal) มีจำนวนลำดับแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของสัญญาณ ถ้าสัญญาณไม่ต่อเนื่องนั้นมีจำนวนอันดับที่สูงมาก ซึ่ง DFT จะใช้เวลาในการคำนวณเสปกตรัมมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจึงได้แก้ปัญหาดังกล่าว โดยใช้ FFT ในการคำนวณหาเสปกตรัมของสัญญาณไม่ต่อเนื่องหรือสัญญาณอนาลอก เพื่อให้การคำนวณหาเสปกตรัมของสัญญาณได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ในขณะที่เดียวกันนอกจากนำ FFT มาใช้วิเคราะห์สัญญาณไซน์อินพุทแล้ว ต้องนำมาวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุท คือสัญญาณไซน์อินพุทที่ได้รับการบิดเบือนจากสมการไม่เป็นเชิงเส้นชนิดพีซซ์และโอเวอร์ไดรฟ์ จากรูปที่ 2.10 และ 2.11 พบว่าสัญญาณเอาต์พุทชนิดพีซซ์และโอเวอร์ไดรฟ์มีความถี่ฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นนอกจากฮาร์โมนิกหลัก นั้นหมายความว่า การบิดเบือน หรือการตัดยอดของสัญญาณนั้นเกิดจากการรวมสัญญาณ (Composite signal) ที่มีความถี่และเฟสแตกต่างกันออกไปรวมอยู่ในสัญญาณเดียวกันทำให้รูปแบบของสัญญาณได้รับการบิดเบือนไปจากเดิม ตัวอย่างของการรวมสัญญาณเป็นไปดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สัญญาณที่ถูกบิดเบือนนั้นเกิดจากสัญญาณที่มีค่าความถี่และเฟสหลายๆสัญญาณมารวมกันทำให้อยู่ในรูปสัญญาณการบิดเบือนในแบบต่าง ๆ [17] จะสังเกตเห็นว่าสัญญาณที่ได้รับตัดยอดมาก จะมีจำนวนสัญญาณมารวมกันมาก ดังเช่นสัญญาณเอาต์พุทชนิดพีซซ์ และในทางกลับกัน สัญญาณที่ได้รับการตัดยอดน้อยกว่า(Soft clipping) จะมีจำนวนสัญญาณมารวมกันน้อยกว่า ดังเช่นสัญญาณเอาต์พุทชนิดโอเวอร์ไดรฟ์



รูปที่ 2.12 การรวมกันของสัญญาณ



a. Time-domain decomposition of a composite signal



b. Frequency-domain decomposition of the composite signal

รูปที่ 2.13 ความถี่ฮาร์มอนิกของสัญญาณที่รวมกัน

จากทฤษฎีการรวมกันของสัญญาณสามารถวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณได้ โดยความถี่ฮาร์มอนิกของแต่ละสัญญาณสามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาวิจัยในเรื่องของการประมาณสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นต่อไปได้ โดยจะนำเสนอเพิ่มเติมอีกครั้งในบทถัดไป

2.4 ทฤษฎีโพลิโนเมียลของ Bernstein

จากหัวข้อที่ได้กล่าวมาแล้วเกี่ยวกับสมการไม่เป็นเชิงเส้น คือสมการชนิดพีชช และโอเวอร์ไดรฟ์ ซึ่งเป็นสมการฟังก์ชันคงที่ แต่ในหัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีที่นำมาใช้ประมาณสมการชนิดพีชช และโอเวอร์ไดรฟ์ คือทฤษฎีโพลิโนเมียลของ Bernstein ซึ่งเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความยืดหยุ่นสูงเนื่องจากสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้หลากหลาย ทฤษฎีโพลิโนเมียลของ Bernstein ถูกคิดค้นโดย Mr. Sergei Natanovich Bernstein ชาวรัสเซีย ดังรูปที่ 2.14 ได้เผยแพร่ทฤษฎีโพลิโนเมียลของเบิร์นสไตน์ในปี ค.ศ. 1918 โครงสร้างหลักนั้นคือการนำสมการเส้นตรงในทางคณิตศาสตร์มาทำให้เกิดเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.14 Sergei Natanovich Bernstein (พ.ศ. 2423 – 2511) [15]

จากสมการไม่เป็นเชิงเส้นหรือสมการโพลิโนเมียลโดยทั่วไปแล้วจะมีโครงสร้างดังสมการที่ 2.3

$$p(t) = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_1 t + a_0 \quad (2.3)$$

a_n = ค่าสัมประสิทธิ์

t = สัญญาณอินพุท

n = จำนวนอันดับ; 0, 1, 2....

รากฐานของสมการดังกล่าวขึ้นอยู่กับอยู่ในโครงสร้างสมการของอนุกรมพลังงาน (Power series) ซึ่งมีจำนวนอันดับของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นไม่จำกัด จากสมการที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า สมการโพลิโนเมียลนั้นมีค่าอนันต์ หรือไม่จำกัดนั่นเอง นั้นหมายความว่า การสร้างสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นในแบบที่ต่าง ๆ นั้น บางสัญญาณอาจต้องใช้จำนวนอันดับสูงๆ เพื่อให้ได้รูปแบบสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นที่ต้องการ ดังนั้นจึงทำให้สัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นใช้พื้นที่สูง และใช้เวลานานในการวิเคราะห์และประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีโพลิโนเมียลของBernstein ซึ่งเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นที่ถูกออกแบบมาเพื่อการออกแบบความโค้ง และความชันของสมการไม่เป็นเชิงเส้นที่จำนวนอันดับต่ำ โดยใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสมการโพลิโนเมียลของBernstein โดยสมการโพลิโนเมียลของBernstein แสดงดังสมการที่ 2.4

$$B_{i,n}(t) = \sum_i^n \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \quad (2.4)$$

t = สัญญาณอินพุท

i = จำนวนอันดับ; $n = 0, 1, 2, \dots, N$

n = จำนวนอันดับสูงสุด

โดยกำหนดให้

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (2.5)$$

ซึ่งคือสัมประสิทธิ์โพลิโนเมียล (Binomial coefficient)

ผลรวมเชิงเส้น (Linear combination) ของโพลิโนเมียลแบบ Bernstein ดังสมการที่ 2.6 ดังนี้

$$\sum B_{i,n}(t) = B_{i=0}^n(t) + B_{i=1}^n(t) + B_{i=2}^n(t) + \dots + B_{i=n}^n(t) \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.6 คือสมการโพลิโนเมียลของBernsteinในหัวข้อนี้จะแนะนำการวิเคราะห์สมการโพลิโนเมียลของBernsteinอันดับ 3 ($n = 3$) เนื่องจากเป็นจำนวนอันดับที่นำมาใช้ในงานวิจัยเล่มนี้ เริ่มจากสมการของ $B_0^n(t)$ สามารถเขียนได้ดังสมการดังต่อไปนี้

สมการโพลิโนเมียลของBernsteinลำดับที่ $i = 0$ และ $n = 3$

$$B_0^3(t) = \sum_0^3 \binom{3}{0} t^0 (1-t)^{3-0} \quad (2.7)$$

$$B_0^3(t) = 1 * 1 * (1-t)^3 \quad (2.8)$$

$$B_0^3(t) = (1-t)^3 \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการโพลิโนเมียลของBernsteinลำดับที่ $i = 1$ และ $n = 3$

$$B_1^3(t) = \sum_1^3 \binom{3}{1} t^1 (1-t)^{3-1} \quad (2.10)$$

$$B_1^3(t) = 3 * t * (1-t)^2 \quad (2.11)$$

$$B_1^3(t) = 3t - 6t^2 + 3t^3 \quad (2.12)$$

สมการโพลิโนเมียลของBernsteinลำดับที่ $i = 2$ และ $n = 3$

$$B_2^3(t) = \sum_2^3 \binom{3}{2} t^2 (1-t)^{3-2} \quad (2.13)$$

$$B_2^3(t) = 3 * t^2 * (1-t)^1 \quad (2.14)$$

$$B_2^3(t) = 3t^2(1-t) \quad (2.15)$$

สมการโพลิโนเมียลของBernsteinลำดับที่ $i = 3$ และ $n = 3$

$$B_3^3(t) = \sum_3^3 \binom{3}{3} t^3 (1-t)^{3-3} \quad (2.16)$$

$$B_3^3(t) = 1 * t^3 * (1-t)^0 \quad (2.17)$$

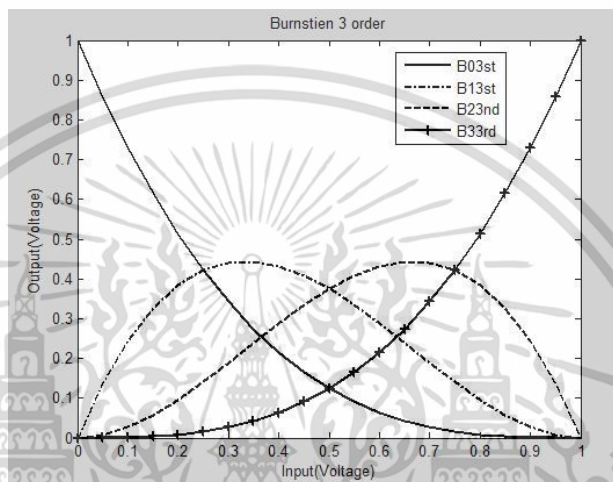
$$B_3^3(t) = t^3 \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสามารถเขียนสมการ Bernstein อันดับ 3 ได้ดังนี้

$$\sum B_{0,3}(t) = (1-t)^3 + 3t(1-t)^2 + 3t^2(1-t) + t^3 \quad (2.19)$$

จากสมการโพลิโนเมียลของเบิร์นสไตน์ Bernstein อันดับ 3 สามารถเขียนรูปสัญญาณได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.15. สมการไม่เป็นเชิงเส้นของ Bernstein (Bernstein Polynomial)

จากรูปที่ 2.15 จะสังเกตเห็นว่าลักษณะสัญญาณของ Bernstein มีรูปโค้งที่สมมาตรเหมาะสำหรับใช้ในการนำไปประมาณหรือออกแบบเส้นโค้งของสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ โดยทฤษฎีที่ใช้สำหรับการออกแบบเส้นโค้งของ Bernstein นั้นคือทฤษฎีเส้นโค้งของ Bezier หรือทฤษฎีเส้นโค้ง Bezier ของ Bernstein โดยรายละเอียดของวิธีดังกล่าวจะอธิบายเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

2.5 ทฤษฎีเส้นโค้งของ Bezier (Bezier Curve)

ทฤษฎีเส้นโค้งของ Bezier เป็นทฤษฎีที่คิดค้นขึ้นโดยวิศวกรอัตโนมัติชื่อ Pierre Bezier [16] แสดงดังรูปที่ 2.16 โดยการนำทฤษฎีโพลิโนเมียลของ Bernstein มาเป็นรากฐานในการสนับสนุนและพัฒนาการทำงานของสมการโพลิโนเมียล Bernstein หรือโดยทั่วไปเรียกทฤษฎีนี้ว่า Bezier-Bernstein Model โดยสมการของ Bezier curves เป็นไปตามสมการดังนี้



รูปที่ 2.16 Pierre Bezier (พ.ศ. 2453 – 2542) [16]

$$B_{i,n}(t) = \sum_i^n P_i * \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \quad (2.20)$$

t = สัญญาณอินพุต

i = จำนวนอันดับ; $n = 0, 1, 2, \dots, N$

n = จำนวนอันดับสูงสุด

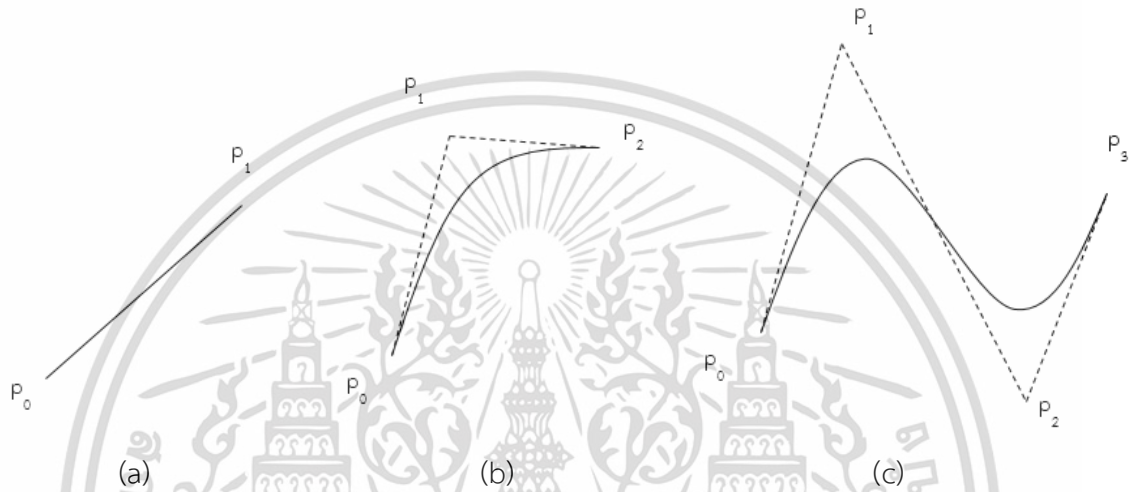
P_i = จุดควบคุม

จากสมการที่ 2.20 จะเห็นว่าโครงสร้างของสมการของ Bezier จะเป็นโครงสร้างเดียวกับ Bernstein แต่สิ่งที่เพิ่มเติมขึ้นมาคือจุดควบคุม (Control points) หรือ P_i โดยจุดควบคุมคือพารามิเตอร์ที่มีคุณสมบัติในการเพิ่มความชันและกำหนดทิศทางส่วนโค้งของสัญญาณทำให้สามารถออกแบบลักษณะของสัญญาณได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น ดังที่แสดงในภาพที่ 2.17 ในทางปฏิบัติแล้วทฤษฎีเส้นโค้งของ Bezier จะนำไปใช้ออกแบบงานเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์กราฟิกเป็นส่วนมาก หรืองานที่ต้องใช้รายละเอียดในการออกแบบเส้นโค้ง ทั้งความลึก และความหนาของภาพที่ได้รับการออกแบบโดยคอมพิวเตอร์ เช่น การออกแบบตัวถังรถยนต์ การออกแบบภาพแอนิเมชัน (Animation) ฯลฯ เพราะฉะนั้นสมการของ Bezier สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบสมการโพลิโนเมียลของ Bernstein อันดับสามได้ดังนี้

$$\sum X(t) = P_0 * (1-t)^3 + P_1 * 3t(1-t)^2 + P_2 * 3t^2(1-t) + P_3 * t^3 \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.21 จะเห็นได้ว่าจุดควบคุมจะเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ให้กับสมการโพลิโนเมียลของBernsteinในแต่ละอันดับแยกจากกันโดยอิสระ เพื่อทำให้เห็นภาพการทำงานของBezier curve ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้ทำการอธิบายเพิ่มเติมพร้อมทั้งรูปภาพประกอบ ดังรูปที่ 2.17 ดังนี้



รูปที่ 2.17 เส้นโค้งที่มาจากสมการของ Bezier curves

จากรูปที่ 2.17(a) จะเห็นว่าเป็นสมการเส้นตรง (อันดับหนึ่ง) ที่มีจุดควบคุมสองจุด จุดควบคุมทั้งสองจุดเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมความชันและทิศทางของเส้นโค้ง ดังนั้นเมื่อจุดควบคุม P_0 และ จุดควบคุมจุดต้นและ P_1 ควบคุมจุดปลายของสัญญาณ จากรูปที่ 2.17(b) สมการไม่เป็นเชิงเส้น (อันดับสอง) ที่มีจุดควบคุมสามจุด ดังนั้นเมื่อจุดควบคุม P_0 และ จุดควบคุมจุดต้นและ P_2 ควบคุมจุดปลายของสัญญาณ จะเห็นว่า P_1 คือพารามิเตอร์ที่กำหนดทิศทางของเส้นโค้งและเกิดความชันขึ้นเป็นเส้นโค้ง ทำให้เกิดจำนวนของความชันเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าจาก สมการเส้นตรง (อันดับหนึ่ง) จากรูปที่ 2.17(c) สมการไม่เป็นเชิงเส้น (อันดับสาม) ที่มีจุดควบคุมสี่จุด เป็นเส้นโค้งที่ได้จากสมการที่ 2.21 จะพบว่าจุดควบคุม P_0 และ จุดควบคุมจุดต้นและ P_3 ควบคุมจุดปลายของสัญญาณ จากนั้นพบว่า P_1 และ P_2 คือพารามิเตอร์ที่กำหนดทิศทางของเส้นโค้งและเกิดความชันขึ้นเป็นเส้นโค้ง ทำให้เกิดจำนวนของความชันเพิ่มขึ้นเป็นสามเท่าจาก สมการเส้นตรง (อันดับหนึ่ง) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า จำนวนของความชันนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนอันดับของสมการส่วนความชันแล้วเส้นโค้งของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของจุดควบคุมที่กำหนดให้นั่นเอง

หลักการทํางานของสมการ Bezier-Bernstein curves สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.21 เพื่อต้องการจัดรูปแบบของสมการให้อยู่ในรูปของสมการไม่เป็นเชิงเส้น และหาค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละอันดับของสมการ สามารถเขียนสมการ Bezier-Bernstein curves ออกมาได้เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$\sum X(t) = P_0 * (-t^3 + 3t^2 - 3t + 1) + P_1 * (3t^3 - 6t^2 + 3t) + P_2 * (-3t^3 + 3t^2) + P_3 * t^3 \quad (2.22)$$

$$\sum X(t) = (-P_0 + 3P_1 - 3P_2 + P_3)t^3 + (3P_0 - 6P_1 + 3P_2)t^2 + (-3P_0 + 3P_1)t + P_0 \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.22 ใช้คุณสมบัติการจัดกลุ่มเพื่อให้สมการอยู่ในรูปแบบของสมการไม่เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่ 2.23 วิธีการจัดกลุ่มนั้นจะทำให้เกิดความซับซ้อนมากขึ้นเมื่อสมการนั้นมีจำนวนอันดับที่สูงขึ้น เพื่อลดความซับซ้อนดังกล่าว สามารถนำสมการของBezier curves มาจัดอยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ (Matrix) ดังสมการที่ 2.24

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2 \\ \mathbf{p}_3 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

จากสมการ Bezier curves ดังสมการที่ 2.23 จะเห็นว่าสมการจัดอยู่ในรูปแบบของสมการไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นหากต้องการกำหนดลักษณะของเส้นโค้งให้เป็นไปตามที่ต้องการ สามารถกำหนดจุดควบคุมทั้ง 4 จุดเพื่อให้ได้ส่วนโค้งและความชันที่ต้องการได้ โดยสมการนี้จะใช้ในการประมาณสมการไม่เชิงเส้นชนิดพีชคณิต และโอเวอร์ไดรฟ์ โดยจะอธิบายเพิ่มเติมในบทที่ 4 ในลำดับต่อไป นอกจากสมการของ Bezier-Bernstein curves แล้ว มีอีกหนึ่งสมการที่ช่วยสนับสนุนสมการของ Bezier curves เพื่อทำให้เส้นโค้งที่ได้รับการออกแบบ มีความชันเพิ่มขึ้น และสามารถนำไปใช้ประมาณลักษณะของสัญญาณต่าง ๆ ได้ สมการดังกล่าวนี้เรียกว่าทฤษฎีเส้นโค้งของ Rational-Bezier จะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป

2.6 ทฤษฎีเส้นโค้งของ Rational-Bezier (Rational-Bezier curves)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเส้นโค้งของ Rational-Bezier ซึ่งใช้ทฤษฎี Bezier curves มาเป็นรากฐานในการสร้างโครงสร้างของสมการดังกล่าว จุดประสงค์หลักของสมการ Rational-Bezier คือการใช้ค่าน้ำหนัก (Weight Values) ในการสนับสนุนจุดควบคุมในสมการเส้นโค้งของ Bezier ทำให้ความชันของเส้นโค้งระหว่างจุดมีความยืดหยุ่นและหลากหลายมากยิ่งขึ้นจากเดิม โดยสมการเส้นโค้งของ Rational-Bezier

แสดงดังสมการที่ 2.25

$$R(t) = \frac{\sum_i^n w_i * P_i * B_{i,n}(t)}{\sum_i^n w_i * B_{i,n}(t)} \quad (2.25)$$

t = สัญญาณอินพุต

i = จำนวนอันดับ; $n = 0, 1, 2, \dots, N$

n = จำนวนอันดับสูงสุด

P_i = จุดควบคุม

w_i = ค่าน้ำหนัก (Weight Values)

ดังนั้นสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการไม่เป็นเชิงเส้นอันดับสามได้ดังต่อไปนี้

$$\sum_0^3 R(t) = \frac{B_0^3(t)P_0w_0 + B_1^3(t)P_1w_1 + B_2^3(t)P_2w_2 + B_3^3(t)P_3w_3}{B_0^3(t)w_0 + B_1^3(t)w_1 + B_2^3(t)w_2 + B_3^3(t)w_3} \quad (2.26)$$

กำหนดให้เทอมเศษของสมการ Rational-Bezier เป็น $R_x(t)$ ดังต่อไปนี้

$$R_x(t) = B_0^3(t)P_0w_0 + B_1^3(t)P_1w_1 + B_2^3(t)P_2w_2 + B_3^3(t)P_3w_3$$

และกำหนดให้เทอมส่วนของสมการ Rational-Bezier เป็น $R_y(t)$ ดังต่อไปนี้

$$Ry(t) = B_0^3(t)w_0 + B_1^3(t)w_1 + B_2^3(t)w_2 + B_3^3(t)w_3$$

เพราะฉะนั้นสมการเขียนสมการ $Rx(t)$ และ $Ry(t)$ ให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ดังต่อไปนี้

$$R\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2 \\ \mathbf{p}_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$Ry(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

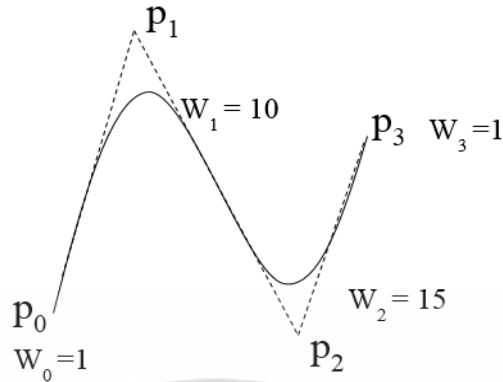
หลังจากที่ได้นำสมการ $Rx(t)$ และ $Ry(t)$ ผ่านกระบวนการเมทริกซ์แล้ว พบว่าสมการ Rational-Bezier นั้นเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีรูปแบบดังต่อไปนี้

$$\sum_0^3 R(t) = \frac{P_0 \cdot w_0(-t^3 + 3t^2 - 3t + 1) + P_1 \cdot w_1(3t^3 - 6t^2 + 3t) + P_2 \cdot w_2(-3t^3 + 3t^2) + P_3 \cdot w_3 t^3}{w_0(-t^3 + 3t^2 - 3t + 1) + w_1(3t^3 - 6t^2 + 3t) + w_2(-3t^3 + 3t^2) + w_3 t^3} \quad (2.29)$$

$$\sum_0^3 R(t) = \frac{(-P_0 \cdot w_0 + 3P_1 \cdot w_1 - 3P_2 \cdot w_2 + P_3 \cdot w_3)t^3 + (3P_0 \cdot w_0 - 6P_1 \cdot w_1 + 3P_2 \cdot w_2)t^2}{(-w_0 + w_1 - 3w_2 + w_3)t^3 + (3w_0 - 6w_1 + 3w_2)t^2} + \frac{(-3P_0 \cdot w_0 + 3P_1 \cdot w_1)t + P_0 \cdot w_0}{(-3w_0 + 3w_1)t + w_0} \quad (2.30)$$

ในทางปฏิบัติแล้วหลักการกำหนดค่าน้ำหนักนั้นจะขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบหรือผู้ใช้งาน เส้นโค้งที่มีคุณสมบัติเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นอันดับสามนั้นเรียกได้ว่าเป็นเส้นโค้งแบบสี่เหลี่ยม (Cubic curve) โดยหลักการทั่วไปแล้วจะกำหนดให้ w_0 กับ w_3 มีค่า เป็น 1 เพื่อที่จะทำให้ตำแหน่งจุดต้นและจุดปลายนั้นอยู่ที่ตำแหน่งเดิม จากนั้น w_1 กับ w_2 จะกำหนดค่าตามที่ผู้ออกแบบต้องการเพื่อสร้างเส้นโค้งขึ้นมาในแบบต่างๆ ตัวอย่างดังรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 เส้นโค้งจากสมการ Rational-Bezier curves

จากรูปที่ 2.18 ถ้านำมาเทียบกับรูป 2.17(c) จะพบว่า เส้นโค้งจากสมการ Rational-Bezier curves มีความชันเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการกำหนดค่าน้ำหนักเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากที่ตำแหน่งจุดควบคุม P_1 มีการกำหนดค่าน้ำหนัก $w_1 = 10$ และที่ตำแหน่งจุดควบคุม P_2 มีการกำหนดค่าน้ำหนัก $w_2 = 15$ ทำให้เส้นโค้งมีองศาที่แคบลงเพราะความชันระหว่างจุดควบคุมมีค่าสูงขึ้น จึงสรุปได้ว่า ปริมาณความชันของเส้นโค้งมีความสัมพันธ์ค่าน้ำหนักที่กำหนดนั่นเอง

จากการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นพบว่าทฤษฎีโพลีโนเมียลในรูปแบบต่าง ๆ เคยถูกนำมาใช้ประมาณในงานวิจัยที่หลากหลาย ยกตัวอย่างดังเช่น ในปี ค.ศ. 2008 ได้มีการนำสมการฟังก์ชันคลื่นสี่เหลี่ยม (Square-wave function) มาประมาณฟังก์ชันส่งผ่าน (Transfer function) ของระบบเบส (Bass System) [1] โดยสมการฟังก์ชันคลื่นสี่เหลี่ยมต้องใช้สมการไม่เป็นเชิงเส้นอันดับห้าจึงจะสามารถประมาณได้ใกล้เคียงระบบเบส แต่ข้อเสียในเรื่องของการคำนวณประสิทธิภาพในแต่ละอันดับนั้นมีค่าคงที่ไม่สามารถปรับค่าเพิ่มเติมให้เป็นสัญญาณในแบบอื่นได้ และยังคงใช้สมการฟังก์ชันคลื่นสี่เหลี่ยมอันดับห้าจึงจะประมาณได้ใกล้เคียงมากที่สุด

ในปี ค.ศ. 2010 ได้มีการนำทฤษฎีโพลีโนเมียลของ Legendre มาประมาณวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณ [2] โดยทฤษฎีของ Legendre ต้องใช้สมการไม่เป็นเชิงเส้นอันดับห้าจึงจะสามารถประมาณได้ใกล้เคียงวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณมากที่สุด ข้อดีของการนำทฤษฎีโพลีโนเมียลของ Legendre มาใช้คือ โครงสร้างสมการให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เทอมของอันดับสูง ๆ ส่งผลให้ส่วนประกอบที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC Component) ลดน้อยลง นั่นหมายความว่าสัญญาณที่ผ่านสมการโพลีโนเมียลของ Legendre จะพบสัญญาณรบกวน (Noise) น้อยมาก จากนั้นเมื่อนำสมการโพลี

โนเมียลของ Legendre มาทำงานบนโครงสร้างของอนุกรมโวลเทอรา (Volterra series) พบว่าเมื่อมีการปรับพารามิเตอร์เพื่อปรับเปลี่ยนความถี่ฮาร์มอนิกในแบบต่าง ๆ พบสัญญาณรบกวน (Noise) ก็ยังคงมีค่าน้อยอยู่มากแต่ทว่า ทฤษฎีดังกล่าวยังมีข้อเสียในเรื่องของค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละอันดับนั้นไม่มีค่าคงที่ไม่สามารถปรับได้อย่างหลากหลาย

ในปี ค.ศ. 2016 ได้มีการนำทฤษฎีโพลิโนเมียลของChevbyshv ซึ่งอยู่ในรูปของเชิร์ปเอ็กซ์โปเนนเชียล (Chirp exponential) ในการประมาณฟังก์ชันส่งผ่าน(Transfer function) ของระบบออดิโอ (Audio System) [3] โดยทฤษฎีโพลิโนเมียลของChevbyshv ต้องใช้จำนวนอันดับสูงจึงจะสามารถประมาณได้ใกล้เคียงกับระบบออดิโอมากที่สุด ข้อดีของการนำทฤษฎีโพลิโนเมียลของChevbyshv มาใช้คือ สามารถประมาณได้ใกล้เคียงกับระบบออดิโอเป็นอย่างมาก แต่ยังคงมีข้อเสีย นั่นคือจำนวนอันดับที่ใช้ในการประมาณค่อนข้างสูง และวิธีการนี้ยากต่อการนำมาพัฒนาใช้จริงในเชิงปฏิบัติ

จากการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมการโพลิโนเมียลของBernstein พบว่าสมการโพลิโนเมียลของBernstein นำไปใช้ประมาณสัญญาณในหลากหลายสาขาวิชา ยกตัวอย่างดังเช่นในปี ค.ศ. 2012 มีการนำสมการโพลิโนเมียลของBernstein ประเภท q-Bernstein (q-Bernstein polynomials) มาออกแบบระบบฟัซซี (Fuzzy) [6] โดยจุดประสงค์ของงานวิจัยคือเพื่อใช้ในการกำหนดและตั้งค่าตัวเลขบนระบบของฟัซซีเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นในปี ค.ศ. 2014 พบว่ามีการใช้สมการโพลิโนเมียลของBernstein ในการการออกแบบเครือข่ายส่งผ่านแบบสี่ทาง (4-Way crossover network) [9] โดยจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ใช้สมการโพลิโนเมียลของBernstein ในการรวมสัญญาณกรองความถี่สูง (High pass filter), สัญญาณกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter) และสัญญาณกรองความถี่ย่านกลาง (Band pass filter) และออกแบบรูปร่างของสัญญาณกรองความถี่ทั้งสามชนิดให้มีประสิทธิภาพ พิสูจน์ได้จากผลการวิจัยที่ตำแหน่งส่งผ่าน (Pass band) ตำแหน่งหยุด (Stop band) มีความเรียบ (Flat) ทำให้สามารถกรองความถี่ในแต่ละย่านความถี่ได้เป็นอย่างดี

ในปี ค.ศ. 2016 ได้มีการนำสมการโพลิโนเมียลของBernstein ประเภท Stancu-Bernstein (Stancu -Bernstein polynomials) มาออกแบบความชันของอีควอไลเซอร์ [10] โดยจุดประสงค์ของงานวิจัยคือการกำหนดค่าอัลฟา(Alpha) เพื่อปรับความชันของตำแหน่งที่เป็นช่วงเปลี่ยนความถี่ (Transition band) ของสัญญาณกรองความถี่สูง, สัญญาณกรองความถี่ต่ำ และ สัญญาณกรองความถี่

ย่านกลาง ในอันดับต่ำ ทำให้สัญญาณรองความถี่ทั้งสามชนิดมีความชันมากขึ้นที่จุดตัดความถี่ (Cut off frequency) ทำให้สามารถกรองสัญญาณต่ำ กลาง และสูง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ต่อมา ในปี ค.ศ. 2016 เช่นเดียวกัน ได้มีการนำสมการโพลีโนเมียลของBernstein มาใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทางการแพทย์ นั่นคือการนำสมการโพลีโนเมียลของBernstein มาประมาณกราฟแสดงความดันโลหิต [7] เพื่อนำทฤษฎีดังกล่าวไปใช้ในการตรวจสอบเครื่องมือแพทย์ (Medical device validation) โดยสมการโพลีโนเมียลของBernstein เป็นสมการประเภท Bezier-Bernstein (Bezier curves) ซึ่งสามารถใช้ในการกำหนดจุดควบคุมเพื่อประมาณสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของความดันโลหิตให้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด เพื่อให้ได้มาตรฐานของสัญญาณต้นแบบ เพื่อหาจุดบกพร่องของเครื่องมือวัดความดันโลหิตของทางการแพทย์ว่ามีความเที่ยงตรงหรือไม่ (Medical device calibration)

ต่อมา ได้มีการนำสมการโพลีโนเมียลของBernstein มาใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทางการแพทย์ นั่นคือการนำสมการโพลีโนเมียลของBernstein มาประมาณกราฟแสดงสัญญาณการเต้นของหัวใจ [8] เพื่อนำทฤษฎีดังกล่าวไปใช้ในการตรวจสอบเครื่องมือแพทย์ โดยสมการโพลีโนเมียลของBernstein เป็นสมการประเภท Rational-Bezier (Rational-Bezier curves) ซึ่งสามารถใช้ในการกำหนดจุดควบคุมและกำหนดค่าน้ำหนักเพื่อประมาณสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของการเต้นของหัวใจให้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด เพื่อให้ได้มาตรฐานของสัญญาณต้นแบบ เพื่อหาจุดบกพร่องของเครื่องมือสัญญาณการเต้นของหัวใจของทางการแพทย์ว่ามีความเที่ยงตรงหรือไม่

จากการทบทวนวรรณกรรมดังกล่าวพบว่าสมการโพลีโนเมียลของBernstein นำไปใช้ประมาณสัญญาณในหลากหลายสาขาวิชาไม่ว่าจะเป็นด้านออดิโอ ด้านการประมวลผลสัญญาณ หรือแม้แต่ทางด้านทางการแพทย์ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นยังไม่เคยมีงานวิจัยที่นำทฤษฎีโพลีโนเมียลของBernstein มาใช้ประมาณวงจรรสร้างวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณของกีตาร์ไฟฟ้า วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะหยิบยกนำทฤษฎีโพลีโนเมียลของBernstein มาใช้ในการประมาณ วงจรรสร้างวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณของกีตาร์ไฟฟ้า เพื่อให้เกิดอุปกรณ์ทางด้านดนตรี (Music instrument) ในแบบใหม่ และมีลักษณะเฉพาะของสัญญาณมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 สรุป

วงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์นั้นมีใช้กันอยู่แพร่หลายและทำหน้าที่ดัดแปลงสัญญาณกีตาร์ในรูปสัญญาณไฟฟ้าโดยอาศัยลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจร โดยส่วนมากแล้วจะเป็นเอฟเฟคกีตาร์ที่อยู่ในรูปวงจร เพื่อให้สามารถสร้างและออกแบบวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ในรูปแบบอื่นเช่น ซอฟต์แวร์ หรือ แอปพลิเคชัน จึงได้นำสมการโพลีโนเมียลของBernstein มาใช้ประมาณวงจรสร้างวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณของกีตาร์ไฟฟ้า เพื่อให้เกิดอุปกรณ์ทางด้านดนตรี (Music instrument) ในแบบใหม่และมีลักษณะเฉพาะของสัญญาณมาก ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าในงานวิจัยด้านการประมวลผลสัญญาณหรือด้านออดิโอ ต้องใช้สมการโพลีโนเมียลที่มีจำนวนอันดับสูงและไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์เพื่อปรับเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณให้มีความหลากหลายได้ อีกทั้งสมการโพลีโนเมียลของBernstein นำไปใช้ประมาณสัญญาณในหลากหลายสาขาวิชาไม่ว่าจะเป็นด้านออดิโอ ด้านการประมวลผลสัญญาณ หรือแม้แต่ทางการแพทย์ ทำให้มั่นใจได้ว่าสมการโพลีโนเมียลของBernstein สามารถนำมาใช้ประมาณวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ได้อย่างแน่นอน โดยวิธีดำเนินการวิจัยนั้นจะอธิบายเพิ่มเติมในบทถัดไป

บทที่ 3

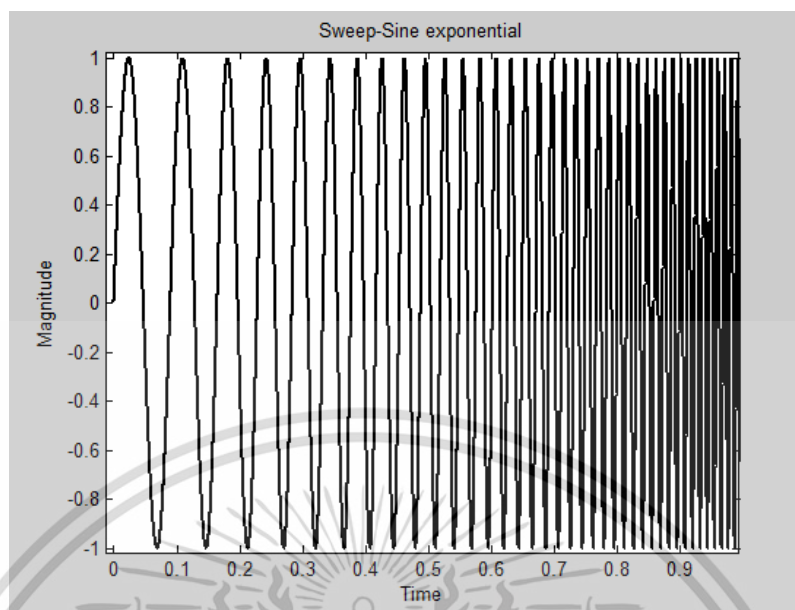
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

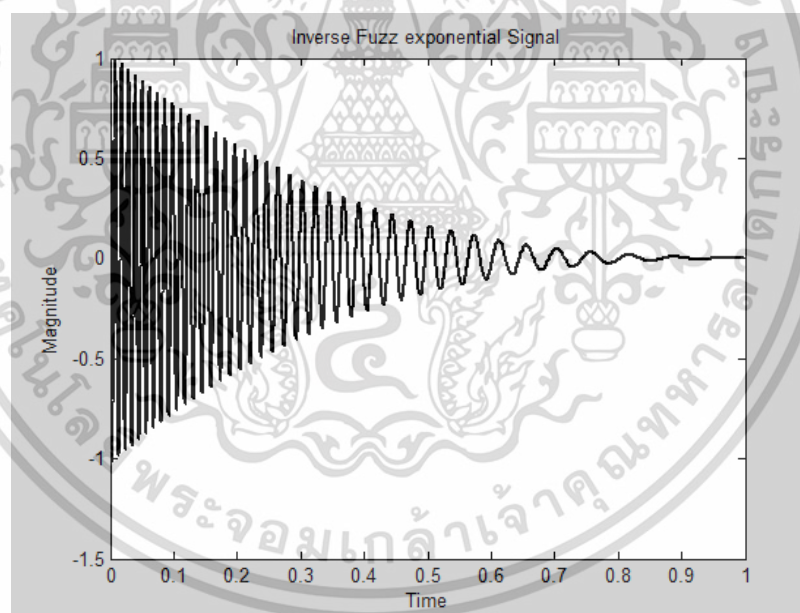
ในทางปฏิบัติการวัดอันดับความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ทำได้ยาก ทำให้การจดจำและระบุพารามิเตอร์ในการควบคุมตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้นทำได้ยากและในการวิเคราะห์สัญญาณของวงจรไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวมีความซับซ้อน ดังนั้นในบทความนี้เสนอวิธีการวัดหาอันดับของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ ที่ทำงานในช่วงไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีคอนโวลูชัน ที่ซึ่งสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละอันดับสำหรับกำหนดอันดับของวงจรไม่เป็นเชิงเส้น หลังจากทราบจำนวนอันดับความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์แล้ว จึงนำข้อมูลดังกล่าวมากำหนดคุณสมบัติสมการโพลีโนเมียลของBernstein ในการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ และสนับสนุนการประมาณของสมการโพลีโนเมียลของBernsteinด้วยทฤษฎีเส้นโค้งของBezier และ ทฤษฎีเส้นโค้งของRational-Bezier เพื่อให้สามารถประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

3.2 การคอนโวลูชัน

วิธีคอนโวลูชันคือการนำอินพุตสัญญาณสวิตช์แอมพลิจูดไซน์ที่ผ่านวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณมาคอนโวลูชันกับตัวกรองอินเวอร์สของสัญญาณสวิตช์อินพุต และได้ผลตอบสองอิมพัลส์แบบหลายค่า ที่สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละอันดับสำหรับกำหนดอันดับของวงจรไม่เป็นเชิงเส้น โดยอันดับแรกนำสัญญาณอินพุตซึ่งสัญญาณเสียงจากกีตาร์ไฟฟ้า และสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณจากเอฟเฟกกีตาร์คือ และถัดไปนำสัญญาณอินพุตหรือ $s(t)$ มาทำการอินเวอร์ส คือการกลับค่าเวลากับแอมพลิจูด สัญญาณเอาต์พุตมาทำการคอนโวลูชันกันดังสมการ เรียกสัญญาณที่ได้จากการคอนโวลูชันนี้ว่าผลรวมของการตอบสนองอิมพัลส์ จากข้อมูลทั้งหมด ได้ทำการทดลองสร้างสัญญาณสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียลและสัญญาณอินเวอร์สสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียล[4]-[5] จากนั้นได้ทำการจำลองผลของสัญญาณด้วยโปรแกรมแมทแลป (Matlab) ได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นสัญญาณดังรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1. สัญญาณสวิตช์ไซน์เอ็กโปเนนเชียล

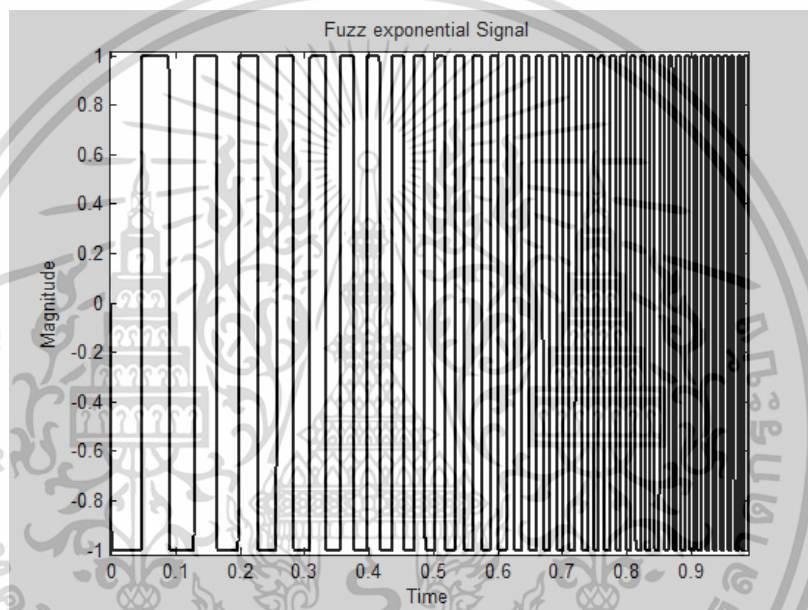


รูปที่ 3.2. สัญญาณอินเวอร์สสวิตช์ไซน์เอ็กโปเนนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การคอนโวลูชันของความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถววจับผลความบิดเบือนชนิดพีชชี่

การคอนโวลูชันของสมการไม่เป็นเชิงเส้นชนิดพีชชี่เอฟเฟคนี้ สามารถทำได้โดยการนำสัญญาณอินพุตซึ่งสัญญาณเสียงจากกีตาร์ไฟฟ้านั้นคือสัญญาณสวิชไนส์เอ็กโพเนนเชียลดังรูปที่ 3.1 ซึ่งความถี่คือความถี่ของสายเปิดของสายเส้นที่ 6 = 90Hz และความถี่สุดท้ายคือความถี่ของเฟลตที่24 ของสายเส้นที่ 6 = 330Hz มาผ่านวงจรถววจับผลความบิดเบือนชนิดพีชชี่ ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.3

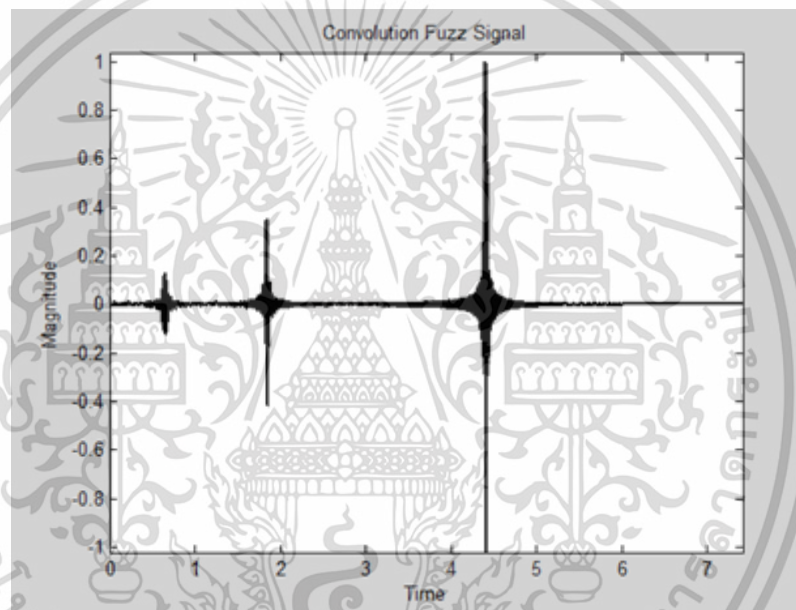


รูปที่ 3.3. สัญญาณสวิชไนส์เอ็กโพเนนเชียลที่ผ่านวงจรถววจับผลความบิดเบือนชนิดพีชชี่

จากนั้นนำสัญญาณอินเวิร์สสวิชไนส์เอ็กโพเนนเชียล และสัญญาณสวิชไนส์เอ็กโพเนนเชียลที่ผ่านวงจรถววจับผลความบิดเบือนชนิดพีชชี่มาทำการคอนโวลูชันกันกับสัญญาณที่ได้จากการคอนโวลูชันนี้ว่าผลรวมของการตอบสนองอิมเพาส์หรือ $h(t)$ ดังรูปที่ 3.4.

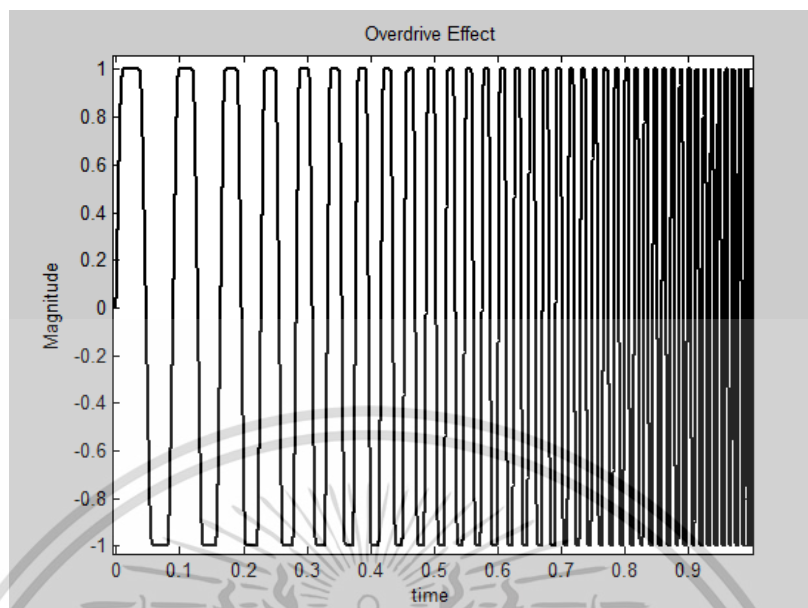
3.2.2 การคอนโวลูชันของความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดโอเวอร์ไดรฟ์

การคอนโวลูชันของสมการไม่เป็นเชิงเส้นชนิดโอเวอร์ไดรฟ์เอฟเฟกต์นั้น สามารถทำได้โดยการนำสัญญาณอินพุตซึ่งสัญญาณเสียงจากกีตาร์ไฟฟ้านั้นคือสัญญาณสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียลดังรูปที่ 3.1 ซึ่งความถี่คือความถี่ของสายเปิดของสายเส้นที่ 6 = 90Hz และความถี่สุดท้ายคือความถี่ของเฟลตที่ 24 ของสายเส้นที่ 6 = 330Hz มาผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.5

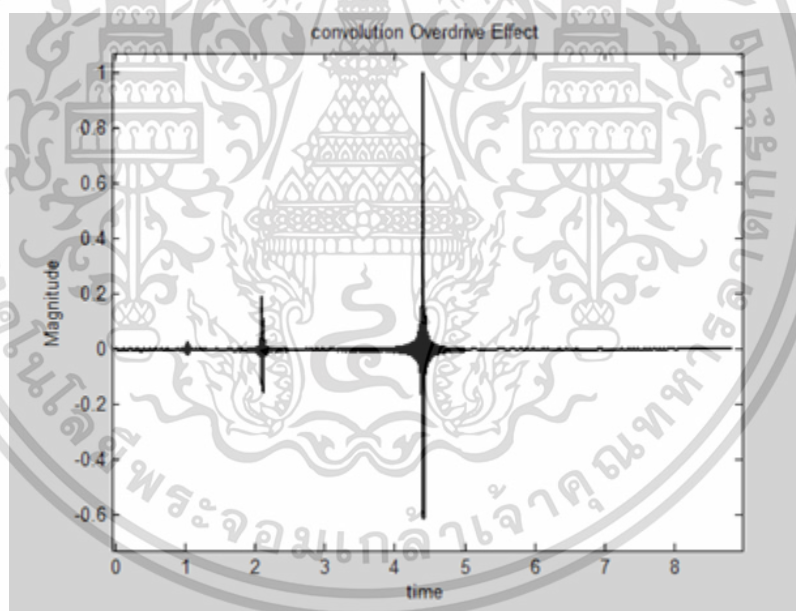


รูปที่ 3.4. ผลการคอนโวลูชันระหว่าง สัญญาณอินเวิร์สสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียล และสัญญาณสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียลที่ผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดพัซซ์

จากนั้นนำสัญญาณอินเวิร์สสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียล และสัญญาณสวิตช์ไซน์เอ็กโพเนนเชียลที่ผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดโอเวอร์ไดรฟ์มาทำการคอนโวลูชันกันกับสัญญาณที่ได้จากการคอนโวลูชันนี้ว่าผลรวมของการตอบสนองอิมพัลส์หรือ $h(t)$ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5. สัญญาณสวิตช์เอ็กโปเนนเชียลที่ผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดโอเวอร์ไดรฟ์



รูปที่ 3.6. ผลการคอนโวลูชันระหว่าง สัญญาณอินเวิร์สสวิตช์เอ็กโปเนนเชียล และสัญญาณสวิตช์เอ็กโปเนนเชียลที่ผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนชนิดโอเวอร์ไดรฟ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณอิมพัลส์ที่ได้จากการคอนโวลูชันนั้น พบว่าสัญญาณอิมพัลส์เอาท์พุทที่แสดงจำนวนของอิมพัลส์มีทั้งหมดเป็นจำนวน 3 พจน์ ซึ่งตรงกับจำนวนอันดับ $n=3$ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ถูกทำให้เป็นปกติของแต่ละอันดับของสมการ สามารถเขียนเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1. ตารางแสดงสมการที่ได้จากผลการคอนโวลูชัน

ชนิดของเอฟเฟค	จำนวนอันดับ	สมการโพลิโนเมียล
Fuzz	3	$0.9899x^3 + 0.3033x^2 + 0.0283x$
Overdrive	3	$0.9972x^3 + 0.1765x^2 + 0.06822x$

จากผลการคอนโวลูชันเพื่อหาอันดับความไม่เป็นเชิงเส้น ให้ผลออกมาเป็นสมการโพลิโนเมียลของฟัซซ์และโอเวอร์ไดรฟ์ และจำนวนอันดับของวงจรถ่วงเอฟเฟคก็ตรงแล้ว จึงได้นำผลลัพธ์ที่ได้จากตารางที่ 3.1 มาทำการวิจัยในลำดับต่อไป

3.3 การประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณด้วยสมการโพลิโนเมียลของ Bernstein

จากวิธีคอนโวลูชันที่นำเสนอในหัวข้อที่ 3.2 นั้นทำให้ทราบว่าจำนวนอันดับของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดฟัซซ์ และ โอเวอร์ไดรฟ์คืออันดับสาม หรือ $n=3$ ฉะนั้นบทนี้จึงได้นำเสนอการประมาณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณ ด้วยสมการโพลิโนเมียลของ Bernstein อันดับสาม วิธีการประมาณของสมการโพลิโนเมียลของ Bernstein สามารถปรับลักษณะเด่นของการบิดเบือนของสัญญาณได้ เพื่อให้เสียงการบิดเบือนของสัญญาณมีลักษณะเสียงที่แตกต่างไปจากเดิม

3.3.1 การประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณด้วยสมการเส้นโค้งของ Bezier

สมการโพลิโนเมียลของ Bernstein ที่นำมาใช้ประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดฟัซซ์เป็นไปตามสมการที่ 2.19 สามารถปรับลักษณะของสัญญาณได้อย่างหลากหลายจากการกำหนดพารามิเตอร์บางตัวซึ่งเรียกว่าจุดควบคุม (Control Points) ซึ่งอยู่ในสมการเส้นโค้งของ Bezier ตามสมการที่ 2.23 ดังนั้นวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิด

ฟิซซ์ ถูกประมาณด้วยการกำหนดค่าของจุดควบคุม 4 จุด ดังนี้ $P_{ix} = [P_{0x}=-1, P_{1x}=-0.1, P_2=0.1$ and $P_3=1]$ และ $P_{iy} = [P_{0y}=-1, P_{1y}=-1, P_{2y}=1$ and $P_{3y}=1]$ สามารถเขียนเป็นสมการเส้นโค้งของ Bezier ได้ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$B_x(t) = t^3 + 0.3t^2(1-t) - 0.3t(1-t)^2 - (1-t)^3 \quad (3.1)$$

$$B_y(t) = t^3 + t^2(1-t) - t(1-t)^2 - (1-t)^3 \quad (3.2)$$

เช่นเดียวกัน ได้ทำการนำสมการโพลีโนเมียลของ Bernstein ที่นำมาใช้ประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์เป็นไปตามสมการที่ 2.19 สามารถปรับลักษณะของสัญญาณได้อย่างหลากหลายจากการกำหนดพารามิเตอร์บางตัวซึ่งเรียกว่าจุดควบคุม (Control Points) ซึ่งอยู่ในสมการเส้นโค้งของ Bezier ตามสมการที่ 2.23 ดังนั้นวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ ถูกประมาณด้วยการกำหนดค่าของจุดควบคุม 4 จุด ดังนี้ $P_{ix} = [P_{0x}=-1, P_{1x}=-0.5, P_2=0.5$ and $P_3=1]$ และ $P_{iy} = [P_{0y}=-1, P_{1y}=-1, P_{2y}=1$ and $P_{3y}=1]$ สามารถเขียนเป็นสมการเส้นโค้งของ Bezier ได้ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4

$$B_x(t) = t^3 + 0.5t^2(1-t) - 0.5t(1-t)^2 - (1-t)^3 \quad (3.3)$$

$$B_y(t) = t^3 + t^2(1-t) - t(1-t)^2 - (1-t)^3 \quad (3.4)$$

เมื่อได้สมการเส้นโค้งของ Bezier ที่ใช้สำหรับประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดฟิซซ์ และโอเวอร์ไดรฟ์แล้ว เพื่อที่จะสนับสนุนการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดฟิซซ์ และโอเวอร์ไดรฟ์โดยสมการเส้นโค้งของ Bezier วิธีดังกล่าวนี้คือ ทฤษฎีเส้นโค้งของ Ration-Bezier ดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.3.2 การประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณด้วยสมการเส้นโค้งของ Ration-Bezier

การสนับสนุนการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดฟิซซ์ และโอเวอร์ไดรฟ์โดยสมการเส้นโค้งของ Ration-Bezier โดยคุณสมบัติของทฤษฎีดังกล่าวนี้ได้อธิบายรายละเอียดไปแล้วในบทที่สอง ดังนั้นวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดฟิซซ์ จึงถูก

ประมาณด้วยสมการเส้นโค้งของ Ration-Bezier คือการกำหนดค่าน้ำหนัก 4 จุด ดังนี้ $w_i = [w_0=0.07, w_1=1, w_2=0.5 \text{ and } w_3=0.009]$ สามารถเขียนเป็นสมการเส้นโค้งของ Bezier ได้ตั้งสมการที่ 3.5 และ 3.6 หลักการกำหนดค่าน้ำหนักได้อธิบายรายละเอียดไปแล้วในบทที่ 2

$$R_x(t) = \frac{0.009t^3 + 0.15t^2(1-t) - 0.3t(1-t)^2 - 0.07(1-t)^3}{0.009t^3 + 0.5t^2(1-t) + t(1-t)^2 + 0.07(1-t)^3} \quad (3.5)$$

$$R_y(t) = \frac{0.009t^3 + 0.5t^2(1-t) - t(1-t)^2 - 0.07(1-t)^3}{0.009t^3 + 0.5t^2(1-t) + t(1-t)^2 + 0.07(1-t)^3} \quad (3.6)$$

เช่นเดียวกัน เพื่อเป็นการสนับสนุนการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ ดังนั้นวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ จึงถูกประมาณด้วยสมการเส้นโค้งของ Ration-Bezier คือการกำหนดค่าน้ำหนัก 4 จุด ดังนี้ $w_i = [w_0=0.01, w_1=1.2, w_2=1.2 \text{ and } w_3=0.01]$ สามารถเขียนเป็นสมการเส้นโค้งของ Bezier ได้ตั้งสมการที่ 3.7 และ 3.8

$$R_x(t) = \frac{0.01t^3 + 0.6t^2(1-t) - 0.6t(1-t)^2 - 0.01(1-t)^3}{0.01t^3 + 1.2t^2(1-t) + 1.2t(1-t)^2 + 0.01(1-t)^3} \quad (3.7)$$

$$R_y(t) = \frac{0.009t^3 + 1.2t^2(1-t) - 1.2t(1-t)^2 - 0.01(1-t)^3}{0.01t^3 + 1.2t^2(1-t) + 1.2t(1-t)^2 + 0.01(1-t)^3} \quad (3.8)$$

หลังจากที่ได้สมการโพลีโนเมียลของ Bezier curves และ Rational-Bezier curves จากการประมาณวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีซซ์และโอเวอร์ไดรฟ์แล้ว จะนำสมการดังกล่าวไปพลอตกราฟด้วยโปรแกรมแมทแล็บเพื่อวิเคราะห์กราฟแสดงความไม่เป็นเชิงเส้นของผลความบิดเบือนของสัญญาณทั้งสองชนิด โดยผลการพลอตกราฟนั้นจะแสดงในบทที่ 4 ผลการวิจัย

3.4 สรุป

จากวิธีการดำเนินการวิจัย การวัดหาอันดับของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ที่ทำงานในช่วงไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีคอนโวลูชัน ที่ซึ่งสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละอันดับสำหรับกำหนดอันดับของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีซซ์ และโอเวอร์ไดรฟ์ จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมาประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับพีซซ์ และโอเวอร์ไดรฟ์ ด้วยสมการโพลีโนเมียลของ Bernstein และสนับสนุนการประมาณของสมการโพลีโนเมียลของ Bernstein ด้วยทฤษฎีเส้นโค้งของ Bezier และ ทฤษฎีเส้นโค้งของ Rational-Bezier เพื่อให้สามารถประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทำให้ได้สมการได้สมการโพลีโนเมียลของ Bezier curves และ Rational-Bezier curves ออกมา จากนั้นจะนำสมการดังกล่าวไปพลอตกราฟด้วยโปรแกรมแมทแล็บเพื่อวิเคราะห์กราฟแสดงความไม่เป็นเชิงเส้นของผลความบิดเบือนของสัญญาณทั้งสองชนิด โดยผลการพลอตกราฟนั้นจะแสดงในบทถัดไป

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 บทนำ

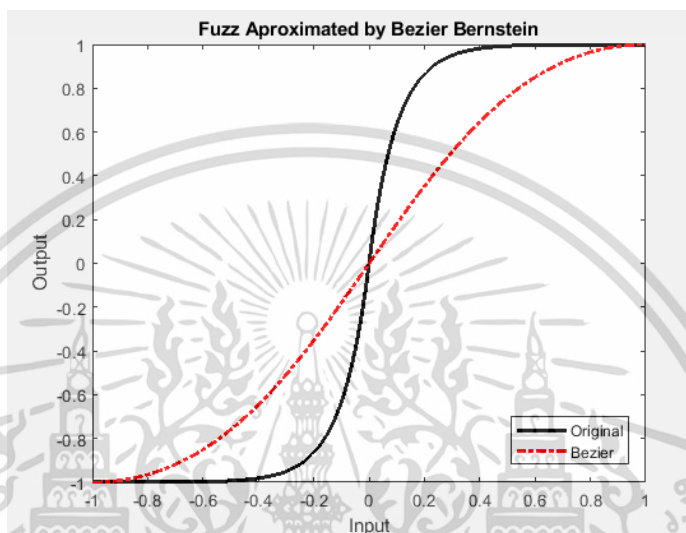
จากวิธีการดำเนินการวิจัยในบทที่ 3 สามารถคำนวณหาอันดับของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกิตาร์ที่ทำงานในช่วงไม่เป็นเชิงเส้นด้วยกระบวนการคอนโวลูชัน จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมา ประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับพีซซ์ และโอเวอร์ไดรฟ์ ด้วยสมการโพลิโนเมียลของ Bernstein และสนับสนุนการประมาณของสมการโพลิโนเมียลของ Bernstein ด้วยทฤษฎีเส้นโค้งของ Bezier และ ทฤษฎีเส้นโค้งของ Rational-Bezier ทำให้ได้สมการได้สมการโพลิโนเมียลของ Bezier curves และ Rational-Bezier curves ออกมา ดังนั้นในบทนี้จะนำสมการดังกล่าวไปพลอตกราฟด้วยโปรแกรมแมทแลปเพื่อวิเคราะห์กราฟแสดงความไม่เป็นเชิงเส้นของผลความบิดเบือนของสัญญาณทั้งสองชนิด โดยผลการพลอตกราฟนั้นจะแสดงดังต่อไปนี้

4.2 กราฟแสดงผลการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณด้วยสมการเส้นโค้งของ Bezier

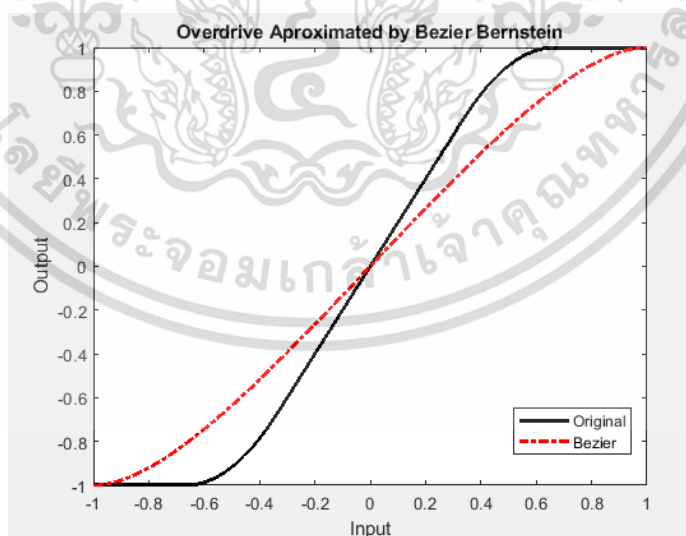
จากสมการเส้นโค้งของ Bezier ที่นำมาใช้ประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีซซ์ เป็นไปตามสมการที่ 3.1 และ 3.2 สามารถพลอตออกมาเป็นกราฟแสดงผลการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีซซ์ได้ดังรูปที่ 4.1 พบว่า มีรูปแบบของกราฟใกล้เคียงกันกับสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีซซ์ แต่ความชันของสมการเส้นโค้งของ Bezier ที่จุดเปลี่ยนผ่านความถี่ยังมีความชันน้อยกว่าสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีซซ์ และความเรียบของจุดตัดความถี่และจุดความถี่ผ่านได้ยังไม่เรียบมากเพียงพอเช่นเดียวกับสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีซซ์

จากนั้นนำสมการเส้นโค้งของ Bezier ที่นำมาใช้ประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ เป็นไปตามสมการที่ 3.3 และ 3.4 สามารถพลอตออกมาเป็นกราฟแสดงผลการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ ได้ดังรูปที่ 4.2 พบว่า มีรูปแบบของกราฟใกล้เคียงกันกับสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่วงจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์

ตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ ความชันของสมการเส้นโค้งของ Bezier ที่จุดเปลี่ยนผ่านความถี่ยังมีความชันใกล้เคียงสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์อยู่มาก และความเรียบของจุดตัดความถี่และจุดความถี่ผ่านได้มีความเรียบมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีซซ์



รูปที่ 4.1. การประมาณวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีซซ์ด้วยสมการเส้นโค้งของ Bezier

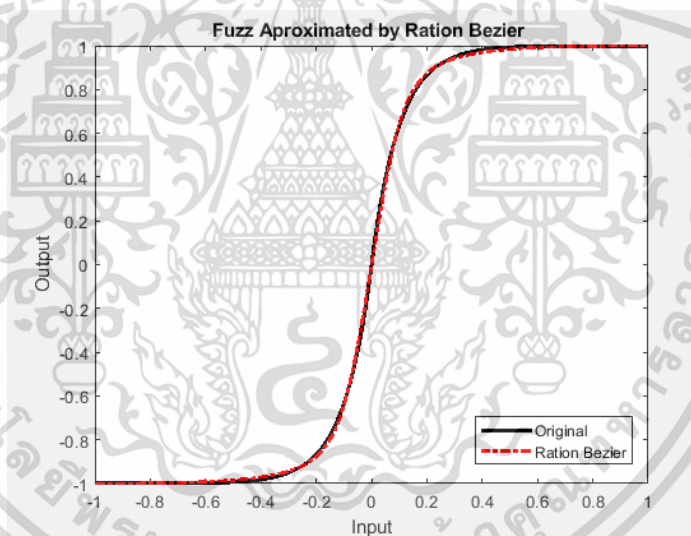


รูปที่ 4.2. การประมาณวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ด้วยสมการเส้นโค้งของ Bezier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 กราฟแสดงผลการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถววจับผลความบิดเบือนของสัญญาณด้วยสมการเส้นโค้งของ Rational-Bezier

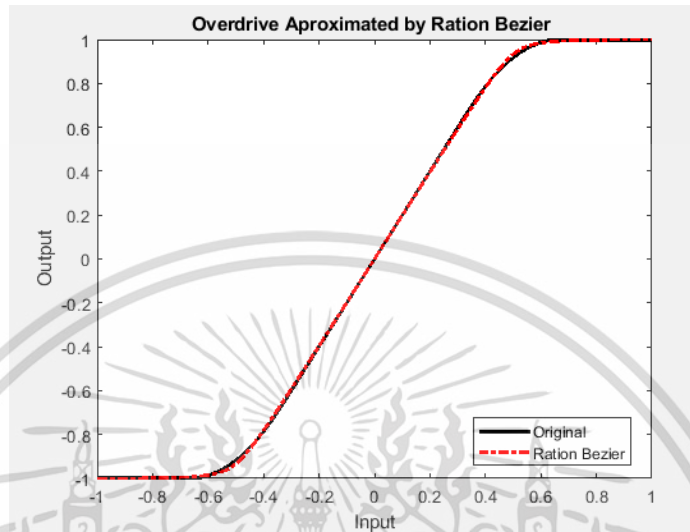
จากสมการเส้นโค้งของ Rational-Bezier ที่นำมาใช้ประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถววจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีชชี่ เป็นไปตามสมการที่ 3.5 และ 3.6 สามารถเขียนออกมาเป็นกราฟแสดงผลการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถววจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีชชี่ได้ดังรูปที่ 4.3 พบว่า มีรูปแบบของกราฟใกล้เคียงกันกับสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถววจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีชชี่ ความชันของสมการเส้นโค้งของ Rational-Bezier ที่จุดเปลี่ยนผ่านความถี่ยังมีความชันใกล้เคียงกับสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถววจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีชชี่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การประมาณด้วยสมการเส้นโค้งของ Bezier และความเรียบของจุดตัดความถี่และจุดความถี่ผ่านได้มีความเรียบมากเพียงพอเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถววจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีชชี่



รูปที่ 4.3. การประมาณวงจรถววจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดพีชชี่ด้วยสมการเส้นโค้งของ Rational-Bezier

จากนั้น ได้นำสมการเส้นโค้งของ Rational-Bezier ที่นำมาใช้ประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถววจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ เป็นไปตามสมการที่ 3.7 และ 3.8 สามารถเขียนออกมาเป็นกราฟแสดงผลการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถววจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ได้ดังรูปที่ 4.4 พบว่า มีรูปแบบของกราฟใกล้เคียงกันกับสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถววจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ ความชันของสมการเส้นโค้งของ

Bezier ที่จุดเปลี่ยนผ่านความถี่ที่มีความชันใกล้เคียงสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์อยู่มาก และมีความเรียบมากกว่าสมการเส้นโค้งของ Bezier



รูปที่ 4.4. การประมาณวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ด้วยสมการเส้นโค้งของ Rational-Bezier

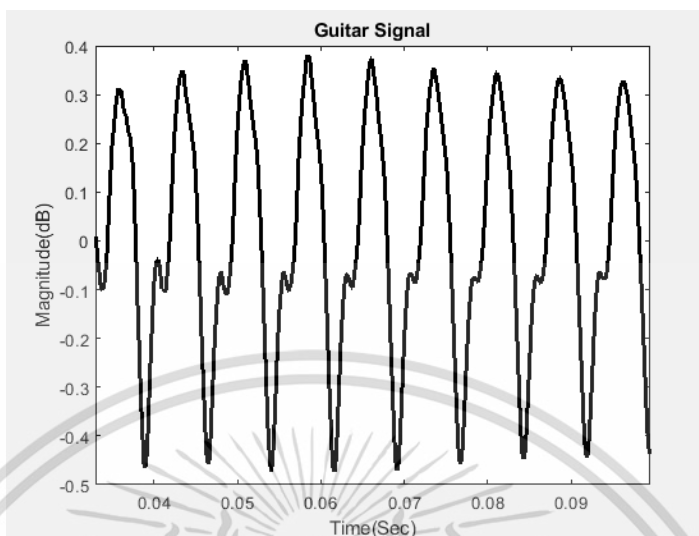
4.4 การประมาณวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณในรูปแบบเสียงต่างๆ

4.4.1 สัญญาณกีตาร์อินพุท (Input Guitar Signal)

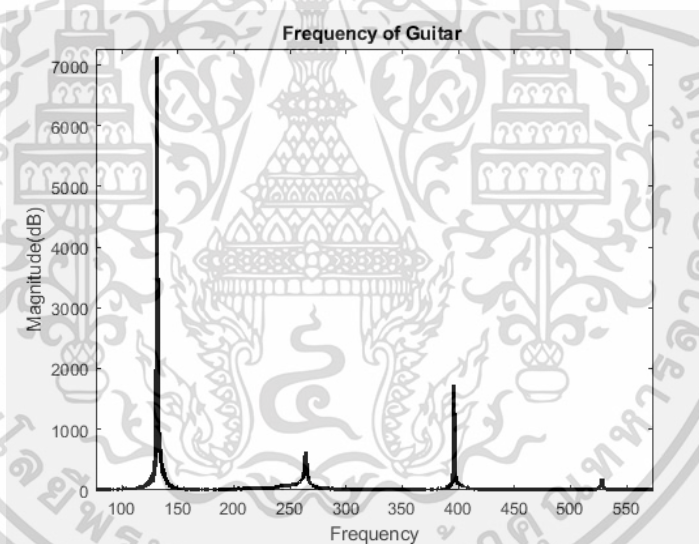
หัวข้อนี้ได้นำสัญญาณกีตาร์ไฟฟ้ามาใช้เป็นสัญญาณอินพุท โดยความถี่ของกีตาร์ที่นำมาใช้ทดสอบคือ 130 Hz หรือโน้ตตัว C แสดงดังรูปที่ 4.5 และความถี่ฮาร์โมนิกของสัญญาณกีตาร์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.6

4.4.2 สัญญาณกีตาร์ที่ผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณในรูปแบบเสียงต่างๆ

เพื่อที่จะปรับแต่งลักษณะเสียงในแบบใหม่ๆ ดังนั้นจึงได้นำสัญญาณกีตาร์ไฟฟ้าดังกล่าวผ่านวงจรผลกระทบการบิดเบือนชนิดฟิชซ์ และปรับแต่งให้เป็นเสียงชนิด Blue (Soft distortion), Pop rock (Medium distortion), Metal (Hard distortion) โดยลักษณะของสัญญาณกีตาร์ไฟฟ้าที่ผ่านวงจรผลการบิดเบือนที่ซึ่งปรับแต่งให้เป็นเสียงทั้งสามชนิด เป็นไปดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9

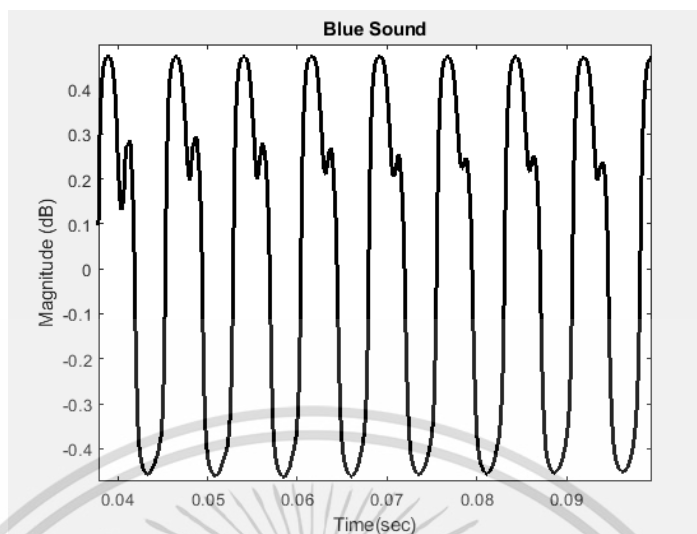


รูปที่ 4.5. สัญญาณกีตาร์ไฟฟ้า

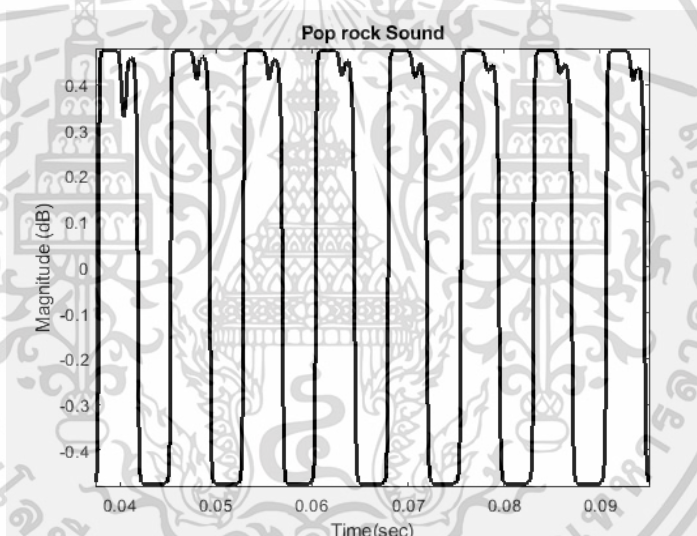


รูปที่ 4.6. ความถี่ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณกีตาร์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

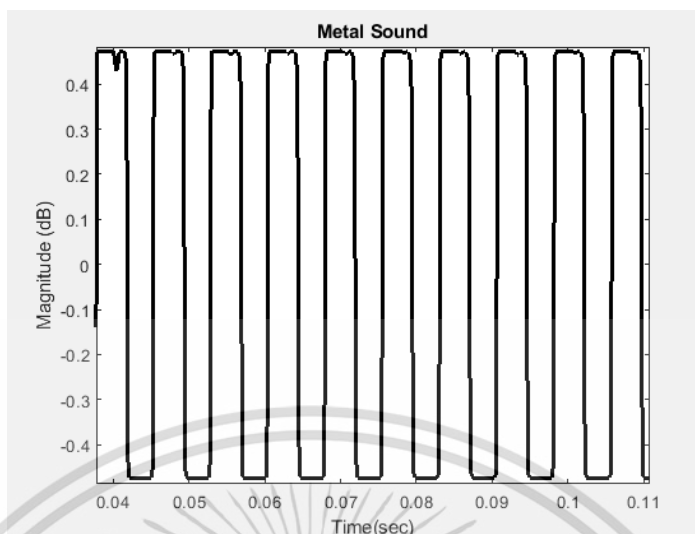


รูปที่ 4.7. สัญญาณเสียง Blue



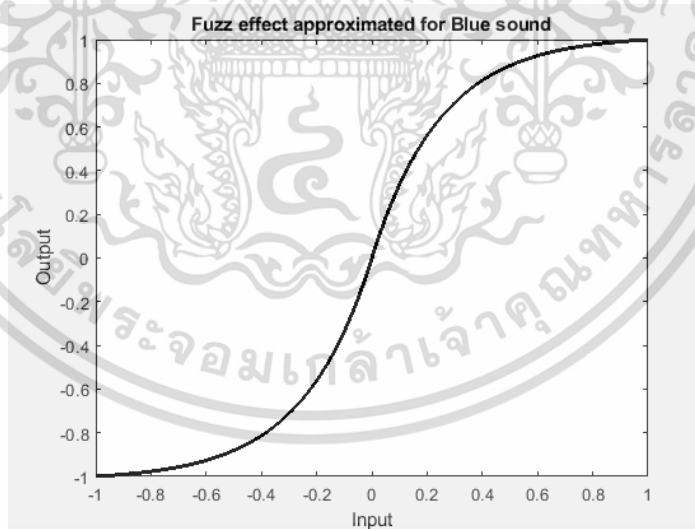
รูปที่ 4.8. สัญญาณเสียง Pop rock

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



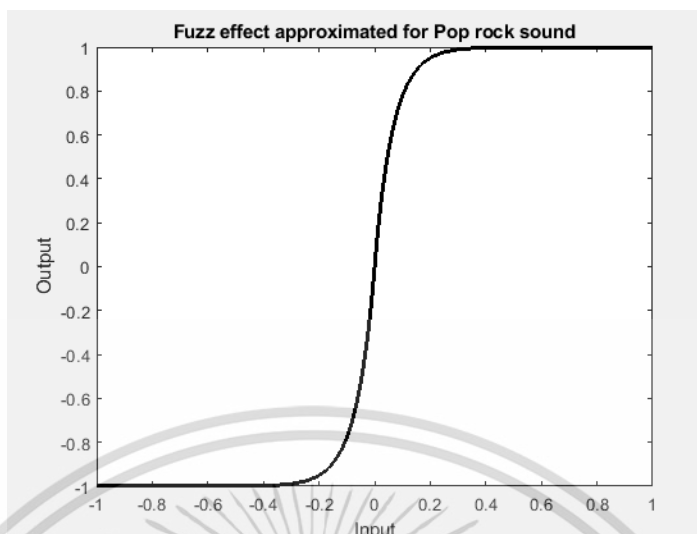
รูปที่ 4.9. สัญญาณเสียง Metal

จากลักษณะสัญญาณของของกีตาร์ไฟฟ้าที่ผ่านวงจรผลกระทบการบิดเบือนชนิดฟัซซ์ และปรับแต่งลักษณะเสียงให้เป็นทั้งสามเสียงดังกล่าว พบว่าความไม่เป็นเชิงเส้นเป็นไปตามรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12

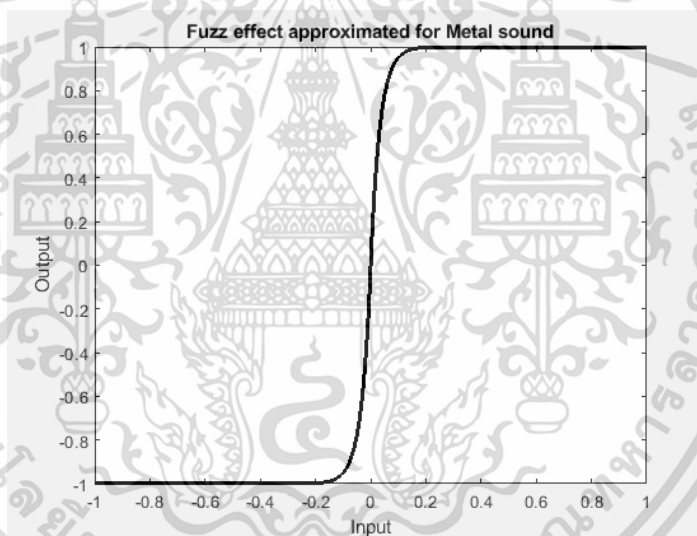


รูปที่ 4.10. สัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของฟัซซ์เอฟเฟกต์สำหรับเสียง Blue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11. สัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของฟัซซีเอฟเฟกต์สำหรับเสียง Pop rock



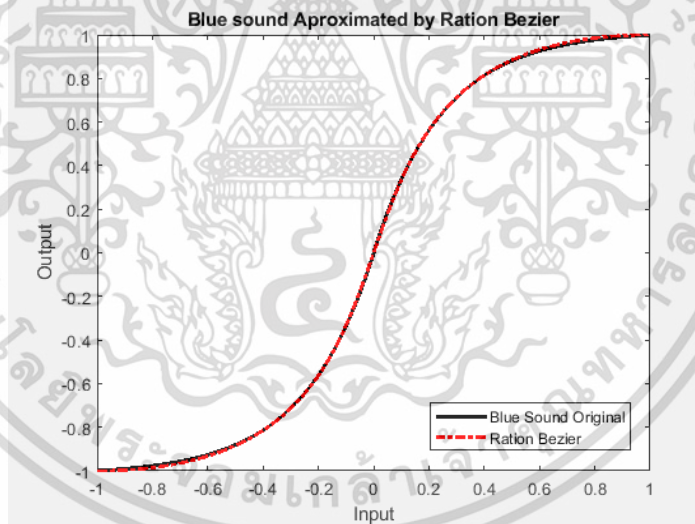
รูปที่ 4.12. สัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของฟัซซีเอฟเฟกต์สำหรับเสียง Metal

เพื่อที่จะประมาณลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรผลกระทบความบิดเบือนของทั้งสามเสียงดังกล่าว จึงได้ปรับจุดควบคุมและค่านำหนักได้ตามตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1. ตารางค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ปรับลักษณะใหม่ของเสียง

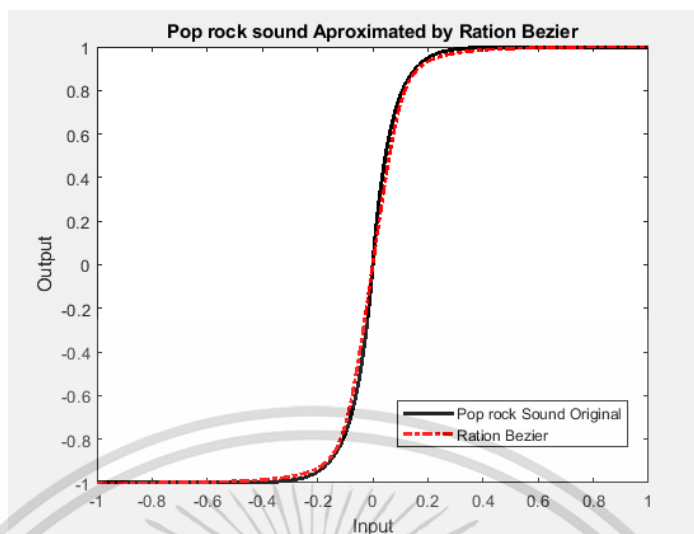
ชนิดของเอฟเฟค	จุดควบคุม (Control points)	ค่าน้ำหนัก (Weights)
Blue sound	$P_{0x}=-1 ; P_{1x}=0.45 ; P_{2x}=-0.45 ; P_{3x}=1$ $P_{0y}=-1 ; P_{1y}=-1 ; P_{2y}=1 ; P_{3y}=1$	$W_0=-1 ; W_1=1 ; W_2=1 ; W_3=1$
Pop rock sound	$P_{0x}=-1 ; P_{1x}=-0.1 ; P_{2x}=0.1 ; P_{3x}=1$ $P_{0y}=-1 ; P_{1y}=-1 ; P_{2y}=1 ; P_{3y}=1$	$W_0=0.1 ; W_1=6 ; W_2=6 ;$ $W_3=0.1$
Metal sound	$P_{0x}=-1 ; P_{1x}=-0.05 ; P_{2x}=0.05 ; P_{3x}=1$ $P_{0y}=-1 ; P_{1y}=0.05 ; P_{2y}=1 ; P_{3y}=1$	$W_0=0.01 ; W_1=1.5 ; W_2=1.5 ;$ $W_3=0.01$

จากการปรับจุดควบคุมและค่าน้ำหนักดังตารางที่ 4.1 สามารถประมาณเสียงชนิด Blue (Soft distortion), Pop rock (Medium distortion), Metal (Hard distortion) ได้ดังรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15

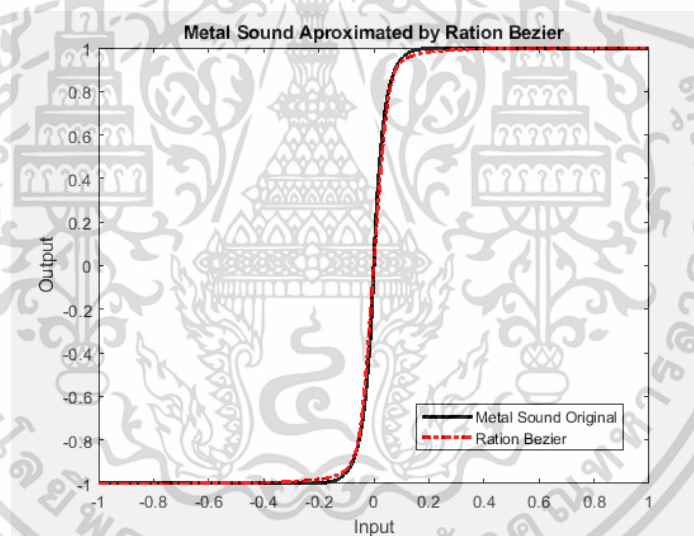


รูปที่ 4.13. การประมาณสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของฟิซซ์เอฟเฟคต์สำหรับเสียง Blue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



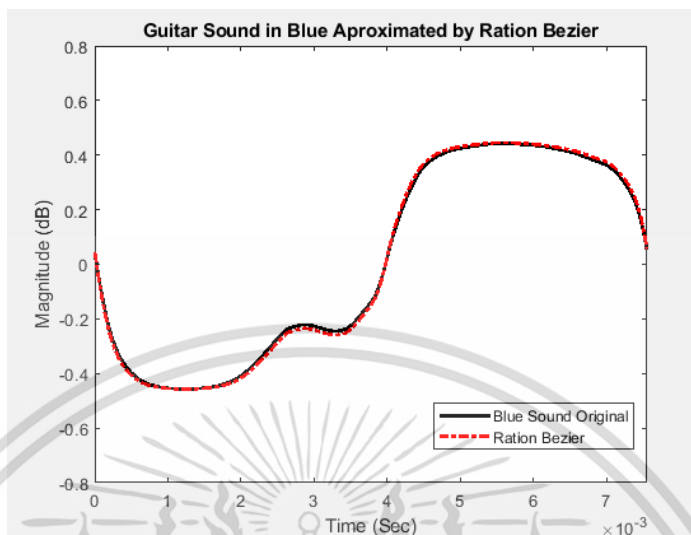
รูปที่ 4.14. การประมาณสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของฟัซซีเอฟเฟกต์สำหรับเสียง Pop rock



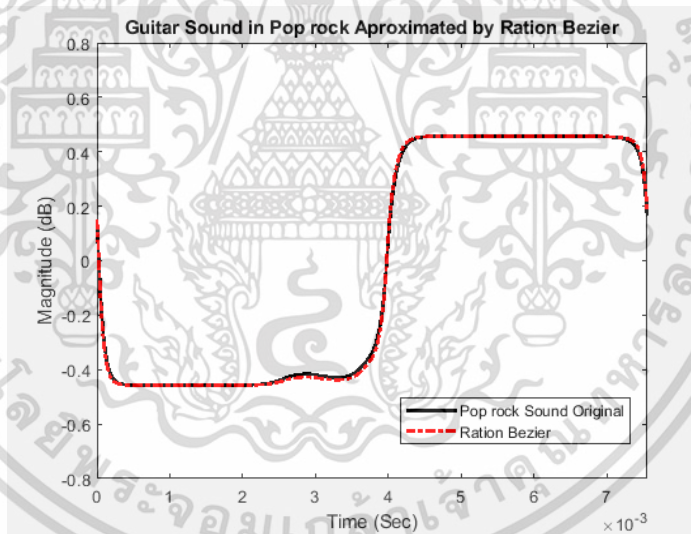
รูปที่ 4.15. การประมาณสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของฟัซซีเอฟเฟกต์สำหรับเสียง Metal

จากนั้นได้ทำการทดลองประมาณสัญญาณกีตาร์ไฟฟ้าจริงโดยใช้สัญญาณกีตาร์อินพุทซึ่งเป็นไปตามข้อที่ 4.4.1 ผ่านสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของฟัซซีเอฟเฟกต์ที่ปรับเสียงเป็นในแบบ Blue, Pop rock และ Metal โดยผลการประมาณแสดงดังรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

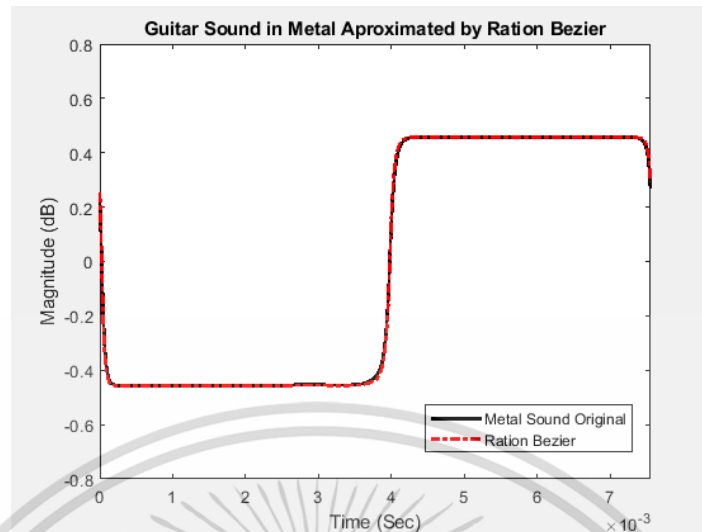


รูปที่ 4.16. การประมาณสัญญาณกีตาร์ที่ผ่านพีซซีเอฟเฟกต์สำหรับเสียง Blue



รูปที่ 4.17. การประมาณสัญญาณกีตาร์ที่ผ่านพีซซีเอฟเฟกต์สำหรับเสียง Pop rock

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



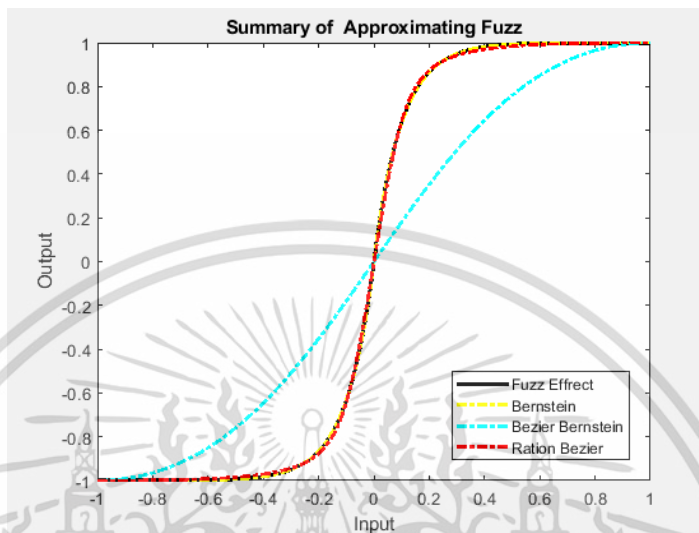
รูปที่ 4.18. การประมาณสัญญาณกีตาร์ที่ผ่านฟิซซ์เอฟเฟกต์สำหรับเสียง Metal

จากผลการประมาณสัญญาณกีตาร์ที่ผ่านฟิซซ์เอฟเฟกต์สำหรับ Blue, Pop rock และ Metal พบว่า สามารถนำสมการของ Ration Bezier Bernstein มาประมาณได้เป็นอย่างดี รวมถึงลักษณะส่วนโค้งของสัญญาณที่แตกต่างและมีความหลากหลายอีกด้วย เนื่องจากลักษณะส่วนโค้งของสัญญาณที่มาจากกีตาร์ไฟฟ้าในแต่ละตัวมีความแตกต่างกันออกไป อีกทั้งแนวเพลงและลักษณะของการบิดเบือนสัญญาณยังมีความแตกต่างกันไปอีกด้วยขึ้นอยู่กับวิธีการปรับของผู้ใช้หรือนักดนตรี ฉะนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า Ration Bezier Bernstein สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ให้ปรับเปลี่ยนลักษณะของสัญญาณได้อย่างหลากหลายและยืดหยุ่น และสามารถนำไปใช้ได้จริงอีกด้วย

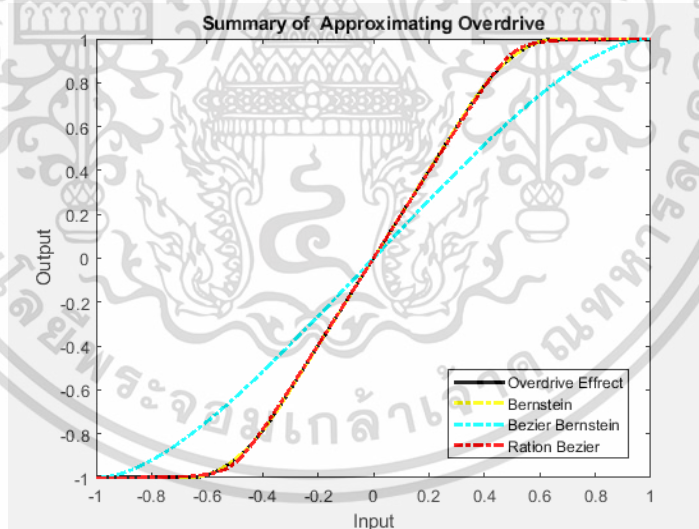
4.5 สรุป

จากผลลัพธ์การประมาณสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของฟิซซ์เอฟเฟกต์ และโอเวอร์ไดรฟ์เอฟเฟกต์ ด้วยสมการเส้นโค้งของ Rational-Bezier ซึ่งถูกปรับค่าพารามิเตอร์นั้น จะเห็นได้ว่าเป็นการประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 รวมถึงการปรับลักษณะเสียงที่แตกต่างกัน เช่น Blue, Pop rock และ Metal สามารถทำได้ดีอีกด้วย ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าทฤษฎีของ Ration-Bezier ดังกล่าวนี้นี้สามารถปรับแต่งให้ลักษณะเสียงนั้นมีความแตกต่างกันออกไปได้ เมื่อได้ผลการวิจัยดังนี้ จึงสามารถสรุปงานวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ โดยจะเสนอเพิ่มเติมในบทที่ 5 สรุปผลการวิจัย เมื่อนำสมการโพลีโนเมียลของ Bernstein นอกจากการปรับแต่งลักษณะของสัญญาณด้วยพารามิเตอร์ของเบิร์นสไตน์แล้วนั้น

ยังสามารถเลือกปรับแต่งอัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิกส์ในแต่ละอันดับอีกด้วย ทั้งนี้อาจต้องใช้เครื่องมืออื่นเสริมในการช่วยปรับ เช่น อีควอลไลเซอร์ (Equalizer) เป็นต้น



รูปที่ 4.19. ภาพรวมการเปรียบเทียบการประมาณสัญญาณของฟิซซ์เอฟเฟกต์



รูปที่ 4.20. ภาพรวมการเปรียบเทียบการประมาณสัญญาณของโอเวอร์ไดร์ฟเอฟเฟกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1) จากวิธีการดำเนินการวิจัยเพื่อหาอันดับอันดับความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ ใช้วิธีการคอนโวลูชันเพื่ออันดับความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ หลังจากทราบจำนวนอันดับความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์แล้ว จึงนำข้อมูลดังกล่าวมาประมาณด้วยสมการโพลีโนเมียลของ Bernstein ในการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ และสนับสนุนการประมาณของสมการโพลีโนเมียลของ Bernstein ด้วยทฤษฎีเส้นโค้งของ Bezier และ ทฤษฎีเส้นโค้งของ Rational-Bezier ทำให้ได้ผลการวิจัยดังความมุ่งหมายที่ตั้งไว้ดังต่อไปนี้

1) อันดับความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ชนิดพีซซ์ และโอเวอร์ไดรฟ์ มีจำนวนอันดับเท่ากับสาม ตามดังผลการดำเนินการวิจัยในหัวข้อการคอนโวลูชัน

2) ผลการวิจัยพบว่า ทฤษฎีโพลีโนเมียลของ Bernstein สามารถประมาณสัญญาณได้ใกล้เคียงกับโอเวอร์ไดรฟ์มากที่สุด เนื่องจากมีรูปแบบของกราฟใกล้เคียงกันกับสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์ ความชันของสมการเส้นโค้งของ Bezier ที่จุดเปลี่ยนผ่านความถี่ที่มีความชันใกล้เคียงสัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณชนิดโอเวอร์ไดรฟ์อยู่มาก และมีความเรียบที่จุดตัดความถี่

5.1.2) จากการปรับแต่งจุดควบคุมของสมการเส้นโค้งของBezier เพื่อที่จะปรับแต่งลักษณะเสียงในแบบใหม่ๆ เช่น Blue (Soft distortion), Pop rock (Medium distortion), Metal (Hard distortion) พบว่าสัญญาณเอาต์พุตนั้นมีความถี่ฮาร์โมนิกขยายเพิ่มมากขึ้นจากอันดับของสมการโพลีโนเมียลของ Bernstein และค่าแอมพลิจูด (Amplitude) นั้นมีความเปลี่ยนแปลงไปตามค่าสัมประสิทธิ์ของสมการโพลีโนเมียลของ Bernstein ซึ่งเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้ลักษณะเสียงนั้นมีความหลากหลายและแตกต่างกันออกไป

5.1.3) จากข้อ 5.1.2) การปรับแต่งจุดควบคุมของสมการเส้นโค้งของ Bezier เพื่อที่จะปรับแต่งลักษณะเสียงในแบบใหม่ๆ เช่น Blue (Soft distortion), Pop rock (Medium distortion), Metal (Hard distortion) จากผลการวิจัยที่ได้มานั้น ได้นำสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณจากกีตาร์ไฟฟ้าจริงผ่านส่วนเส้นโค้งของRational-Bezier โดยใช้โปรแกรมแมทแลป ซึ่งสามารถนำขั้นตอนวิธี (Algorithm) ดังกล่าวนี้ไปพัฒนาเป็นซอฟต์แวร์ได้จริงและสามารถใช้งานกับสัญญาณกีตาร์ไฟฟ้าได้จริง

5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

1) นำวิธีการประมาณของสมการโพลีโนเมียลของ Bernstein มาประมาณวงจรไม่เป็นเชิงเส้นในแบบอื่น ๆ ได้นอกจากวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ เช่น วงจรกรองความถี่ หรือ อีคอลลไลเซอร์ เป็นต้น

2) นำวิธีการประมาณของสมการโพลีโนเมียลของ Bernstein มาปรับพารามิเตอร์เพื่อปรับแต่งสัญญาณของวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณสำหรับกีตาร์ในรูปแบบอื่น ๆ ได้ เช่น Delay, Chorus, Reverb ฯลฯ

3) นำวิธีการประมาณของสมการโพลีโนเมียลของ Bernstein มาปรับแต่งสัญญาณของเสียงดนตรีในรูปแบบอื่น ๆ เช่น Electronic dance (EDM) หรือ เสียงจากเครื่องดนตรีคลาสสิก (Classic instruments)

4) ปัญหาที่พบระหว่างการทำวิจัยคือ สมการโพลีโนเมียลของBernsteinเป็นสมการที่ใช้ประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นด้วยอันดับต่ำและสามารถปรับค่าได้ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการประมาณวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณทั้งชนิดพีซซ์และโอเวอร์ไดรฟ์ ยังได้รูปร่างและส่วนโค้งไม่สมบูรณ์ตรงตามวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณทั้งชนิดพีซซ์และโอเวอร์ไดรฟ์เท่าที่ควร ในการวิจัยครั้งต่อไป จะทำการศึกษาทฤษฎีที่สามารถประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นได้สมบูรณ์มากกว่างานวิจัยเล่มนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nayoo W. “Harmonic and Intermodulation Analysis of Nonlinear Devices Used in Virtual Bass Systems” **Audio Engineering Society**, vol. 124, no. 7403, 17-20 May 2008, pp.1-18.
- [2] Finn T. “Volterra Series Based Distortion Effect” **Audio Engineering Society**, vol. 129, no. 8212, 04-07 November 2017, pp.1-7.
- [3] Adalberto Jr, Bardo E., “Audio Nonlinear Modeling Through Hyperbolic Tangent Functionals”, **International conference of Czech university**, 2016, pp.1-6.
- [4] Antonín N., Laurent S., František K., Pierrick L., “Nonlinear System Identification Using Exponential Swept-Sine Signal”, **IEEE transaction on instrumentation and measurement**, vol. 59, no.8, August 2010. pp.2220-2229.
- [5] Mare R., Romain H., Etienne C., Brain F., “Prediction of harmonic distortion generated by electro-dynamic loudspeakers using cascade of Hammerstein models”, **Audio Engineering Society**, vol. 128, no.7993, 22-25 May 2010. pp.1-10.
- [6] Xuezhi W., Wenjuan Z., “Fuzzy q-Bernstein polynomials”, **International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery**, vol. 9, 2012. pp.71-74.
- [7] Chutchavong V., Janchitrapongvej K., “Bernstein Polynomial and Rational Bézier Curve for Blood Pressure Simulation”, **IEEE Region 10 Conference (TENCON)**, vol 10, 2016. pp.1-5.
- [8] Chutchavong V., Janchitrapongvej K., “A Mathematical Model for ECG Waveform using Rational Bézier Curves and Bernstein Polynomials”, **Proceedings of the International Conference**, 2014. pp.1-5.
- [9] Kriangsak H., Paitoon R., “Design of 4-Way Crossover Network by using Bernstein Polynomial”, **Proceedings of the International Electrical Engineering Congress**, 2014. pp.1-4.

- [10] Chutchavong V., Janchitrapongvej K., “Approximation of Linear Gain Slope Equalizer using Bernstein-Stancu Polynomials”, **IEEE Region 10 Conference (TENCON)**, 2016. pp.1-5.
- [11] Girish GK., Pinjare SL., “Audiogram Equalizer using Fast Fourier Transform”, **International conference on Signal Processing Communication**, 2016. pp.1-5.
- [12] Marui A., Wiliam I., “Multidimensional Perceptual Calibration for Distortion Effects Processing Software” **Audio Engineering Society**, vol. 113, no. 5708, 17-20 May 2002, pp.1-8.
- [13] Robert K., Marko G., Marija J., “Implementation of digital audio effects for electric guitar on DSP platform” **Telecommunications forum TELFOR**, vol. 19, 22-24 November 2011, pp.1-4.
- [14] Chutchavong V., Janchitrapongvej K., “Luminance – Chrominance Gain Equalizer Based on Bernstein Polynomial” **IEEJ Trans.on ELS Japan**, vol. 130, August 2010, pp.1-5.
- [15] Malcous W. 2017 **Sergei Natanovich Bernstein**. [Online]. Available https://en.m.wikipedia.org/wiki/Sergei_Natanovich_Bernstein.
- [16] Malcous W. 2015 **Pierre_Bezier**. [Online]. Available https://en.m.wikipedia.org/wiki/Pierre_Bezier.
- [17] Udo, S. 2002. **DAFX-Digital Audio Effects**. Hamburg : John Wiley & Sons, Ltd.
- [18] Dowsons M. 2017 **Dawsons website music**. [Online]. Available :<https://www.dawsons.co.uk/boss-fz5-fuzz-distortion-guitar-effect-padel>.
- [19] Dowsons M. 2017 **Dawsons website music**. [Online]. Available :<https://www.dawsons.co.uk/boss-overdrive-distortion-guitar-effect-padel>.
- [20] Domon K. 2009 **Electro-tech-online**. [Online]. Available :<https://www.electro-tech-online.com/threads-guitar-distortion-padel.101545/>.

ภาคผนวก ก. ทฤษฎีการคอนโวลูชัน

ก.1 การคอนโวลูชัน

ในทางปฏิบัติการวัดอันดับความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณกิตาร์ทำได้ยาก ทำให้การจดจำและระบุพารามิเตอร์ในการควบคุมตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้นทำได้ยากและในการวิเคราะห์สัญญาณของวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนดังกล่าวมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงได้นำเสนอวิธีการวัดหาอันดับของวงจรเอฟเฟกต์กิตาร์ที่ทำงานในช่วงไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีคอนโวลูชัน โดยการนำอินพุตสัญญาณสวีทแอกโพเนนเชียลไซน์ที่ผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณมาคอนโวลูชันกับตัวกรองอินเวอร์สของสัญญาณสวีทอินพุต และได้ผลตอบสนองอิมพัลส์แบบหลายค่า ที่สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละอันดับสำหรับกำหนดอันดับของวงจรไม่เป็นเชิงเส้น โดยสมการสวีทแอกโพเนนเชียลไซน์แสดงดังสมการที่ ก.1.

$$s(t) = \sin\left[\frac{\omega_1 * N}{\ln \frac{\omega_2}{\omega_1}} * e^{\left(\frac{n}{N} * \left(\ln \frac{\omega_2}{\omega_1}\right)\right)}\right] - 1 \quad (ก.1)$$

ω_1 = ความถี่เรเดียนของความถี่เริ่มต้น

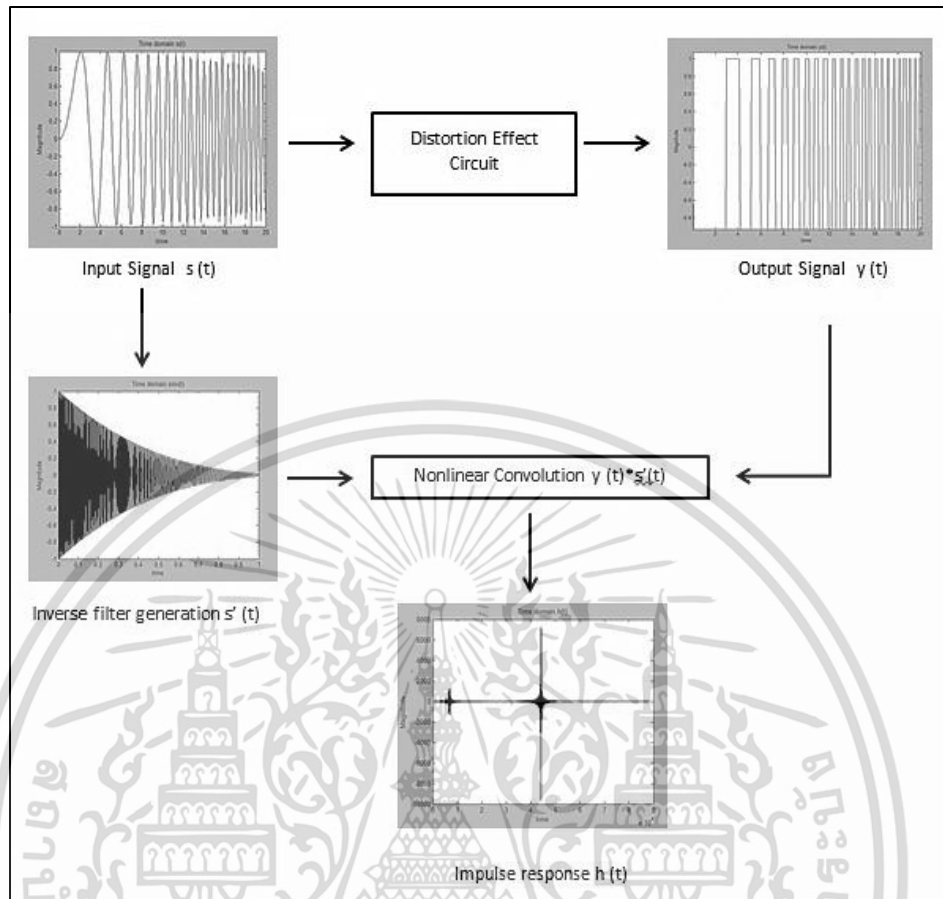
ω_2 = ความถี่เรเดียนของความถี่สุดท้าย

n = ค่าการสุ่มของสัญญาณ

N = จำนวนการสุ่มทั้งหมดของสัญญาณ

ก.2 การคอนโวลูชันแบบไม่เป็นเชิงเส้น

การออกแบบไดโอดแแกรมการคอนโวลูชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 3.1. โดยอันดับแรกนำสัญญาณอินพุตซึ่งสัญญาณเสียงจากกีตาร์ไฟฟ้า $s(t)$ และสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านวงจรตรวจจับผลความบิดเบือนของสัญญาณจากเอฟเฟกต์กิตาร์คือ $y(t)$ และถัดไปนำสัญญาณอินพุตหรือ $s(t)$ มาทำการอินเวอร์สคือการกลับค่าเวลากับแอมพิจูดเรียกสัญญาณดังกล่าวคือ $s'(t)$ นำสัญญาณ $s'(t)$ และสัญญาณ $y(t)$ มาทำการคอนโวลูชันกันดังสมการที่ ก.2 เรียกสัญญาณที่ได้จากการคอนโวลูชันนี้ว่าผลรวมของการตอบสนองอิมพัลส์หรือ $h(t)$



รูปที่ ก.1. บล็อกไดอะแกรมการคอนโวลูชันสำหรับวิเคราะห์วงจรไม่เป็นเชิงเส้น

$$y(t) * s'(t) = \sum_{m=1}^{\infty} h_m(t + \Delta t_m) \quad (\text{ก.2})$$

h_m = สัญญาณอิมพัลส์

t = ช่วงเวลาของสัญญาณ

Δt_m = ช่วงเวลาหน่วงของสัญญาณ

m = จำนวนสัญญาณอิมพัลส์

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายศรัณยู ปาลกะวงศ์
วัน เดือน ปีเกิด	4 ตุลาคม 2533
ที่อยู่	235 หมู่บ้านเศรษฐกิจ ถ.อัสสัมชัญ-อัสสัมชัญ12 แขวงบางไผ่ เขตบางแค กรุงเทพฯ 10160 โทร.0-2421-7235
ประวัติการศึกษา	2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ระบบไม่เป็นเชิงเส้น 2.) ออดิโอ อคูสติก
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.255-2557	ผู้พัฒนาซอฟต์แวร์และทดสอบระบบ - เว็บไซต์และฐานข้อมูลเพื่อการจัดการสตรีมมิง (Streaming) - ออกแบบแอปพลิเคชันเพื่อรองรับสัญญาณภาพเสียงของสตรีมมิง - ออกแบบระบบสัญญาณภาพเสียงเพื่อการไลฟ์สตรีมมิง (Live streaming)
พ.ศ.2557-2560	ตำแหน่งวิศวกรทดสอบทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) - ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ - ทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ฝังตัวในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้