สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียวโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา

UP AND DOWN FREQUENCY CONVERTER USING SINGLE OSCILLATOR BASED ON MULTI-TIME VARIABLE ANALYSIS

T138784

สุรเชษฐ์ ภาณุพัฒนา
SURACHET PANUPATTANA

วพ.
ส848ก
2558
หมวดหมู่.........
เลขทะเบียน 138784
วัน,เดือน,ปี 16 มิ.ค. 2558
12 7 184 27

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

KMITL 2015-EN-M-010-056

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UP AND DOWN FREQUENCY CONVERTER USING SINGLE OSCILLATOR BASED ON MULTI-TIME VARIABLE ANALYSIS

SURACHET PANUPATTANA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

KMITL 2015-EN-M-010-056

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2015
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียวโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา
นักศึกษา	นาย สุรเชษฐ์ ภาณุพัฒนา
รหัสนักศึกษา	55611955
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอ การย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงด้วยหลักการใหม่ที่ไม่จำเป็นต้องใช้วงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์ โดยได้ทำการประยุกต์ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียวเพื่อใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง โดยหลักการที่นำเสนอนั้นอาศัยการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์อันดับที่สองภายใต้อิทธิพลของฟังก์ชั่นบังคับที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยหลักการการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา สำหรับวิธีการย้ายย่านความถี่ที่นำเสนอนั้น เป็นการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงโดยอาศัยฟังก์ชั่นบังคับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณอันดับสอง จากหลักการดังกล่าวทำให้สามารถลดขั้นตอนในการทำงานของระบบสำหรับการย้ายย่านความถี่จึงทำให้วงจรรวมมีขนาดเล็กลงไปด้วย สำหรับการทดลองเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ได้ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงซึ่งประกอบไปด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ เลื่อนเฟส ทวินที ควอดราเจอร์และโคลพิตต์แบบประยุกต์ โดยผลการทดลองที่ได้นั้นแสดงให้เห็นว่าวงจรที่นำเสนอสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีและให้สัญญาณเอาต์พุตที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Up and Down Frequency Converter Using Single Oscillator Based On Multi-Time Variable Analysis
Student	Mr. Surachet Panupattana
Student ID.	55611955
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Pramote Wardkein

ABSTRACT

In this thesis, a new up-and-down frequency conversion technique is proposed. The new technique of frequency conversion using only single oscillator circuit is based on multi-time variables techniques analysis of a second-order oscillator under time-varying forced function. The advantage of this approach is that a single oscillator is employed instead of a mixer circuit. By applying this technique, it can reduce circuit size and circuit complexity. To confirm the proposed technique is applicable, the oscillator using Wien-bridge, Phase-shift, twin-T, Quadrature and Modified Colpitt is experimented. It is found that the proposed circuit can perform as equivalent as the mixer circuit. Also, the results of the presented technique are in agreement with the analysis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์, ผศ.ดร.จีรสุดา โกษียาภรณ์ ซึ่งได้ให้คำปรึกษา และคำชี้แนะ

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ เป็นแรงผลักดัน และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณลุงจ่าคุณานนต์ กิตติพุฒิ สำหรับคำแนะนำที่ดีในเรื่องงานวิจัยและคอยให้กำลังใจและชวนสังสรรค์ตลอดมา

ขอขอบคุณคุณสุธาสิน ศรีสุข ที่คอยช่วยเหลือสำหรับงานวิจัยในด้านต่างๆและสำหรับคำปรึกษาในหลายๆเรื่อง

ขอขอบคุณคุณภากร ศิริโชติดำรงค์ สำหรับการช่วยเหลือในงานด้านโปรแกรม

ขอขอบคุณคุณสินีนาท สตมหาชลาสินธุ์ คุณเลอสรรค์ กิรสมุทรานนท์และคุณศักรินทร์ สินไชย สำหรับการช่วยเหลือในงานด้านเอกสารและความบันเทิงต่างๆ

ขอขอบคุณคุณบุญญาพร การินทร์ สำหรับความช่วยเหลือในงานด้านเอกสารและคอยให้กำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุรเชษฐ์ ภาณุพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญรูป.....VII

สารบัญตาราง.....XII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....2

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....3

1.6 ขอบเขตการวิจัย.....3

1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....4

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....5

2.1 กล่าวนำ.....5

2.2 สถาปัตยกรรมเบื้องต้นของเครื่องรับและส่งสัญญาณของระบบการสื่อสารไร้สาย.....5

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์.....8

2.4 วงจรผสมสัญญาณ.....11

2.4.1 วงจรผสมสัญญาณแบบเดี่ยว.....11

2.4.2 วงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลเดี่ยว.....15

2.4.3 วงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลคู่.....17

2.5 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้น.....19

2.6 การวิเคราะห์ระบบด้วยเทคนิคตัวแปรเวลาหลายตัว.....24

2.6.1 การวิเคราะห์ระบบการกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีที่มีอินพุตสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยหลักการเดิม.....25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.2 การวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณในกรณีที่มีการป้อนอินพุตบังคับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยเทคนิคตัวแปรทางเวลาหลายตัว.............................27

บทที่ 3 การย้ายย่านความถี่ด้วยหลักการวิเคราะห์ของวงจรกำเนิดสัญญาณภายใต้สภาวะอินพุตบังคับโดยอาศัยเทคนิคการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา...37

3.1 กล่าวนำ...37

3.2 หลักการในการย้ายย่านความถี่ที่ได้จากวิเคราะห์ระบบการกำเนิดสัญญาณที่มีการป้อนอินพุตบังคับด้วยเทคนิคการแยกตัวแปรเวลาหลายตัวที่นำเสนอ................37

3.3 การวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณที่นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่.............38

3.3.1 วิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติ...39

3.3.2 วิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับ..53

3.3.3 วิเคราะห์ผลตอบสนองสมบูรณ์...63

บทที่ 4 ผลการทดลอง...66

4.1 ผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์...66

4.2 ผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์...69

4.3 ผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์...72

4.4 ผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์...74

4.5 ผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์...77

4.6 ผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณเอ็ฟเอ็ม...85

4.7 ผลการวัดทดสอบค่าการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์เพื่อใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง.....................88

4.7.1 การวัดทดสอบค่าอัตราขยายแปลงผัน...88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7.2 การวัดทดสอบค่าการลดทอน 1 dB 89

4.7.3 การวัดทดสอบค่า IIP3 97

4.8 สรุป 104

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 107

เอกสารอ้างอิง 109

ภาคผนวก 111

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ 112

ประวัติผู้เขียน 117

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ระบบการสื่อสารพื้นฐาน....6

2.2 แผนผังแสดงภาคส่งของระบบการสื่อสารไร้สาย....7

2.3 แผนผังแสดงภาครับของระบบการสื่อสารไร้สาย....7

2.4 วงจรผสมสัญญาณในอุดมคติ....8

2.5 วงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์โดยใช้อุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น....9

2.6 สเปคตรัมทางความถี่ของวงจรผสมสัญญาณ....11

2.7 วงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไดโอดแบบเดี่ยว....12

2.8 วงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบเดี่ยว....13

2.9 วงจรผสมสัญญาณโดยใช้เฟตทรานซิสเตอร์แบบเดี่ยว....14

2.10 วงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไดโอดแบบสมดุลเดี่ยว....16

2.11 การวิเคราะห์วงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไดโอดแบบสมดุลเดี่ยว....16

2.12 วงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบสมดุลคู่....18

2.13 แผนภาพบล็อกแสดงแบบจำลองของระบบอันดับที่สอง....19

2.14 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์....22

2.15 แผนภาพบล็อกแสดงแบบจำลองของระบบกำเนิดสัญญาณที่มีการป้อนอินพุตบังคับแบบเดิม....25

2.16 แผนภาพบล็อกแสดงแบบจำลองของระบบกำเนิดสัญญาณที่มีการป้อนอินพุตบังคับแบบหลายตัวแปรทางเวลา....27

2.17 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรง สัญญาณไซน์และสัญญาณฟันเลื่อย....30

2.18 แสดงผลเชิงตัวเลขที่มีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์แบบเดิม....32

2.19 แสดงขนาดที่ถูกควบคุมโดยผลตอบสนองบังคับที่ได้ (a) จากการทดลองจริง, (b) ผลการจำลองในโปรแกรม PSPICE และ (c) ผลเชิงตัวเลขโดยยึดหลักการวิเคราะห์แบบใหม่ตามลำดับ....33

2.20 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกป้อนอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรง....34

2.21 เอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกป้อนอินพุตเป็นไฟกระแสตรงบวก 2 โวลท์....35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.22 เอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกป้อนอินพุตเป็นไฟกระแสตรง ลบ 2 โวลท์....36
3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติ....39
3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติ....41
3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติ....44
3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติ....47
3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติ....49
3.6 วงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กความถี่สูง....49
3.7 วงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กความถี่สูงที่ลดรูปแล้ว....50
3.8 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับ....54
3.9 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับ....56
3.10 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับ....58
3.11 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับ....60
3.12 วงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับ....62
4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบเวนบริดจ์ที่ใช้สำหรับย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง....67
4.2 สเปกตรัมสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณ แบบเวนบริดจ์....67
4.3 การทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง....68
4.4 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์....69
4.5 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบเลื่อนเฟสที่ใช้สำหรับย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง....70
4.6 สเปกตรัมสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณ แบบเลื่อนเฟส....70
4.7 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส....71
4.8 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบทวินทีที่ใช้สำหรับย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง....72
4.9 สเปกตรัมสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณ แบบทวินที....73
4.10 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที....74
4.11 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบควอดราเจอร์ที่ใช้สำหรับย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง.... 75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.12 สเปกตรัมสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์....75
4.13 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์....76
4.14 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์โคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ใช้สำหรับย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง....77
4.15 สเปกตรัมสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์....78
4.16 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์....79
4.17 สเปกตรัมของของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง....80
4.18 สเปกตรัมของของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น....80
4.19 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสทั้งสามฮาร์โมนิค....81
4.20 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสทั้งสามฮาร์โมนิค....82
4.21 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ทั้งสามฮาร์โมนิค....83
4.22 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ทั้งสามฮาร์โมนิค....84
4.23 สเปกตรัมของสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณเอฟเอ็ม....86
4.24 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ที่ป้อนอินพุตเป็นสัญญาณเอฟเอ็ม....86
4.25 สเปกตรัมของสัญญาณเอฟเอ็มที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง....87
4.26 สเปกตรัมของสัญญาณเอฟเอ็มที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น....88
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น....90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง..........91

4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น..........92

4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง..........92

4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น..............93

4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง...............93

4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น..........94

4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง...........95

4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น...96

4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง....96

4.37 การวัดทดสอบค่า IIP3 และ OIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง..........97

4.38 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น..........98

4.39 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง..........98

4.40 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น..........99

4.41 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง..........100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.42	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น	101
4.43	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง	101
4.44	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น	102
4.45	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง	103
4.46	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น	104
4.47	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 ตารางผลการวัดทดสอบค่าอัตราขยายแปลงผันสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง....89
4.2 ตารางสรุปผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง....105
4.3 ตารางสรุปผลการวัดทดสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้น....105
4.4 ตารางสรุปผลการวัดทดสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ลง....106
5.1 ตารางสรุปภาพรวมเปรียบเทียบระหว่างหลักการย้ายย่านความถี่แบบทั่วไปกับหลักการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้....108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ด้วยความก้าวหน้าทางวิศวกรรมและเทคโนโลยีในปัจจุบัน ทำให้การดำเนินชีวิตเต็มไปด้วยสิ่งอำนวยความสะดวกในหลายด้านเช่น ด้านการสื่อสาร ด้านพลังงาน ด้านคมนาคมเป็นต้น สำหรับเทคโนโลยีด้านการสื่อสารนั้นมีหลายระบบในการใช้งาน ซึ่งระบบสื่อสารที่มีผลต่อชีวิตมนุษย์อย่างมากนั้นคือระบบการสื่อสารไร้สาย[1-2] โดยการทำงานของระบบการสื่อสารไร้สายนั้นประกอบไปด้วยภาคส่งและภาครับสัญญาณ และช่องสัญญาณในการสื่อสาโดยองค์ประกอบที่ขาดไม่ได้ในทั้งภาคส่งและรับสำหรับทุกระบบการสื่อสารไร้สายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันคือการย้ายย่านความถี่[2-4] การย้ายย่านความถี่นี้มีการใช้งานในหลายระบบการสื่อสารเช่นระบบการสื่อสารดาวเทียม ระบบการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นต้น โดยในภาคส่งต้องมีการแปลงสัญญาณย่านความถี่กลางให้ขึ้นมาอยู่ในย่านความถี่สูงและในภาครับต้องมีการแปลงสัญญาณย่านความถี่สูงให้ลงมาอยู่ในย่านความถี่กลาง การย้ายย่านความถี่มีจุดประสงค์หลักเพื่อให้เกิดความสะดวกในการเลือกและขยายสัญญาณและเพื่อให้การย้ายย่านความถี่ประสบผลมีความจำเป็นต้องอาศัยวงจรผสมสัญญาณและวงจรกำเนิดสัญญาณเป็นสำคัญ ในส่วนของวงจรผสมสัญญาณโดยทั่วไปนั้นแบ่งออกเป็นสามประเภท[2-4] คือ วงจรผสมสัญญาณแบบเดี่ยว (Single-end Mixer) สามารถสร้างได้ง่ายแต่มีกำลังขยายที่ต่ำ วงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลเดี่ยว (Single-balanced Mixer) มีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าแบบแรกแต่มีค่ากำลังขยายที่สูงกว่าและสามารถลดทอนพจน์ความถี่ที่ไม่ต้องการได้แต่ไม่ทั้งหมดและวงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลคู่ (Double-balanced Mixer) สามารถลดทอนพจน์ความถี่ที่ไม่ต้องการได้มากกว่าสองแบบแรกแต่เนื่องจากโครงสร้างมีความซับซ้อนมากกว่าจึงทำให้ต้องการกำลังสัญญาณสูง โดยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในวงจรผสมสัญญาณได้แก่ ไดโอด ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar Junction Transistor) และเฟ็ตทรานซิสเตอร์ (Field Effect Transistor) เป็นต้น ซึ่งในอุปกรณ์เหล่านี้มีคุณลักษณะของการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ด้วยคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้จึงทำให้วงจรผสมสัญญาณสามารถย้ายย่านความถี่ได้และเห็นได้ว่าในการย้ายย่านความถี่จำเป็นต้องอาศัยการทำงานของวงจรผสมสัญญาณและวงจรกำเนิดสัญญาณร่วมกัน ซึ่งถ้าขาดองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งไปจะไม่สามารถย้ายย่านความถี่ได้และด้วยความต้องการของเทคโนโลยีในปัจจุบันนั้นต้องการให้วงจรมีขนาดเล็ก ราคาถูก วงจรใช้ไฟเลี้ยงต่ำและมีประสิทธิภาพที่ดี จึงเป็นสิ่งที่ผู้พัฒนาทุกคนพยายามออกแบบให้สอดคล้องตามความต้องการของเทคโนโลยีในปัจจุบันมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณภายใต้สภาวะอินพุตบังคับโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา[5-6] เพื่อใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียว ซึ่งไม่จำเป็นต้องอาศัยวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์กล่าวคือวงจรกำเนิดสัญญาณประพฤติตัวเป็นทั้งวงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรผสมสัญญาณในเวลาเดียวกัน โดยหลักการย้ายย่านความถี่แบบใหม่นี้สามารถใช้ได้กับวงจรกำเนิดสัญญาณที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับที่สองขึ้นไปและเนื่องจากหลักการย้ายย่านความถี่ที่ได้นำเสนอสามารถย้ายย่านความถี่ได้ด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียว จึงทำให้มีข้อดีกว่าวิธีการอื่นคือไม่จำเป็นต้องออกแบบสร้างวงจรผสมสัญญาณและวงจรกำเนิดสัญญาณแยกกัน ดังนั้นจึงสามารถลดขั้นตอนที่มีอยู่โดยทั่วไปได้ ซึ่งทำให้ระบบมีขนาดเล็กลง มีโครงสร้างที่เรียบง่ายขึ้นและใช้ไฟเลี้ยงที่น้อยลงตามไปด้วย

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายที่ต้องการนำเสนอเทคนิคในการย้ายย่านความถี่แบบใหม่ โดยประยุกต์ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียวในการย้ายย่านความถี่ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับสองบนพื้นฐานการวิเคราะห์แบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา โดยวิธีนี้มุ่งเน้นให้ระบบมีการวิเคราะห์ที่เป็นพื้นฐาน มีโครงสร้างที่เรียบง่ายซึ่งทำให้มีขั้นตอนการทำงานที่ลดลงและทำให้มีขนาดวงจรที่เล็กลงเพราะใช้แค่วงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียวซึ่งประพฤติตัวเป็นทั้งวงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรผสมสัญญาณในเวลาเดียวกันในการย้ายย่านความถี่

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากการค้นคว้าที่ได้สืบค้นมาพบว่าระบบการสื่อสารไร้สายทั้งในภาคส่งและภาครับล้วนแล้วแต่ต้องใช้การย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงเพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมาะสมทั้งในการส่งและการรับสัญญาณซึ่งการย้ายย่านความถี่มีความจำเป็นต้องใช้วงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์ร่วมกับวงจรกำเนิดสัญญาณเป็นสำคัญ ซึ่งถ้าขาดองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งแล้วนั้นจะไม่สามารถทำการย้ายย่านความถี่ได้และจากการได้ค้นคว้าในเรื่องของการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์อันดับที่สองภายใต้อิทธิพลของฟังก์ชั่นบังคับที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยหลักการการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาในหลายงานวิจัย [5-8]

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์ระบบกำเนิดสัญญาณภายใต้สภาวะอินพุตบังคับด้วยเทคนิคแบ่งแยกตัวแปรทางเวลามาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่แบบใหม่เพื่อให้ได้การวิเคราะห์ระบบที่เป็นพื้นฐานและเข้าใจง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเอาหลักการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์อันดับที่สองภายใต้อิทธิพลของฟังก์ชั่นบังคับที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยหลักการการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลามาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียวซึ่งประพฤติตัวเป็นทั้งวงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรผสมสัญญาณภายในเวลาเดียวกัน

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

สำหรับหลักการในการย้ายย่านความถี่ที่นำเสนอนี้ เป็นหลักการในการย้ายย่านความถี่ในรูปแบบใหม่ที่สามารถย้ายย่านความถี่ได้เหมือนกับวิธีการเดิมที่มีอยู่แต่มีขนาดของวงจรรวมเล็กลงกว่าการใช้เทคนิคที่มีอยู่เดิม เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์เพื่อใช้ในการย้ายย่านความถี่ โดยหลักการที่ได้นำเสนอนี้สามารถทำได้ภายในวงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียวซึ่งประพฤติตัวเป็นทั้งวงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรผสมสัญญาณภายในเวลาเดียวกัน ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาในการย้ายย่านความถี่จำเป็นต้องใช้การทำงานของวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์ร่วมกับวงจรกำเนิดสัญญาณเสมอ ดังนั้นในการย้ายย่านความถี่ด้วยหลักการวิเคราะห์ระบบกำเนิดสัญญาณภายใต้สภาวะอินพุตบังคับด้วยเทคนิคแบ่งแยกตัวแปรทางเวลานี้สามารถทำให้สามารถลดขั้นตอนในระบบได้และยังสามารถลดขนาดของวงจรรวมได้อีกด้วย

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอหลักการในการย้ายย่านความถี่แบบใหม่ โดยใช้หลักการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์อันดับที่สองภายใต้อิทธิพลของฟังก์ชั่นบังคับที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยหลักการการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลามาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียว โดยได้ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูง ซึ่งในวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำได้ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์เลื่อนเฟส ทวิน-ที และควอดราเจอร์ในส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่สูงได้ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิตต์ เพื่อเป็นการยืนยันว่าหลักการนี้สามารถใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงได้ด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียวโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของวิทยานิพนธ์ จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัยและส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วยสถาปัตยกรรมเบื้องต้นของเครื่องรับและส่งสัญญาณของระบบการสื่อสารไร้สาย ทฤษฎีพื้นฐานของการย้ายย่านความถี่ การวิเคราะห์ระบบการกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์โดยอาศัยสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง การวิเคราะห์ระบบการกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีที่มีอินพุตเป็นสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยหลักการเดิมและการวิเคราะห์ระบบการกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีที่มีอินพุตเป็นสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยหลักการการแยกตัวแปรทางเวลา

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการย้ายย่านความถี่ที่ได้นำเสนอ ซึ่งได้จากการประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์ระบบการกำเนิดสัญญาณที่มีการป้อนอินพุตบังคับด้วยเทคนิคการแบ่งแยกตัวแปรเวลาหลายตัวและการประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์โดยอาศัยหลักการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาเพื่อใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยผลการทดลองที่ได้จากการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ เลื่อนเฟส ทวินที และควอดราเจอร์ และวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่สูงได้ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ เพื่อให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง ผลการทดลองที่ได้ทำการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณเอฟเอ็มให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์และผลการวัดทดสอบค่าการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ถูกประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง ซึ่งประกอบไปด้วยค่าอัตราขยายแปลงผัน, ค่าการลดทอน 1 dB, ค่า IIP3 และค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิครวม

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

2.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 2 นี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งประกอบไปด้วย

- สถาปัตยกรรมเบื้องต้นของเครื่องรับและส่งสัญญาณของระบบการสื่อสารไร้สาย
- ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์
- วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น
- การวิเคราะห์ระบบกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีที่มีอินพุตที่เป็นสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบดั้งเดิม
- การวิเคราะห์ระบบกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีที่มีอินพุตที่เป็นสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบด้วยเทคนิคการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา

ในส่วนของสถาปัตยกรรมเบื้องต้นของเครื่องรับส่งสัญญาณวิทยุ ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรผสมสัญญาณความถี่หรือมิกเซอร์ วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น และการวิเคราะห์ระบบกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีที่มีอินพุตที่เป็นสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบดั้งเดิมนั้น เป็นการอธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่มีอยู่แบบในเชิงอุดมคติ สำหรับการวิเคราะห์ระบบกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีที่มีอินพุตที่เป็นสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบด้วยเทคนิคการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาเป็นเทคนิคที่นำไปใช้สำหรับอธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ และจากหลักการในเชิงปฏิบัตินี้เอง ทำให้สามารถอาศัยวงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียวในการสร้างวงจรผสมสัญญาณร่วมกับวงจรกำเนิดสัญญาณได้

2.2 สถาปัตยกรรมเบื้องต้นของเครื่องรับและส่งสัญญาณของระบบการสื่อสารไร้สาย

การสื่อสารเป็นการขนส่งหรือส่งผ่านข้อมูลข่าวสารจากแหล่งกำเนิดไปสู่จุดหมายปลายทางที่มีระยะห่างออกไปจากแหล่งกำเนิด การสื่อสารถือได้ว่ามีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งช่วยในการลดระยะทางในการสื่อสารระหว่างบุคคล โดยทั่วไปแล้วการสื่อสารสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การพูด การส่งจดหมาย แม้กระทั่งสัญญาณกลองหรือควันในสมัยโบราณเพื่อแจ้งเหตุการณ์ต่างๆเป็นต้น สำหรับการสื่อสารทางด้านโทรคมนาคมเป็นการใช้อุปกรณ์หรือระบบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการส่ง แพร่กระจายหรือนำพาสัญญาณข้อมูลข่าวสารไปถึงผู้รับด้วยวิธีการต่างๆไม่ว่าจะเป็นทางด้านไฟฟ้า แสง และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในระบบการสื่อสารพื้นฐาน

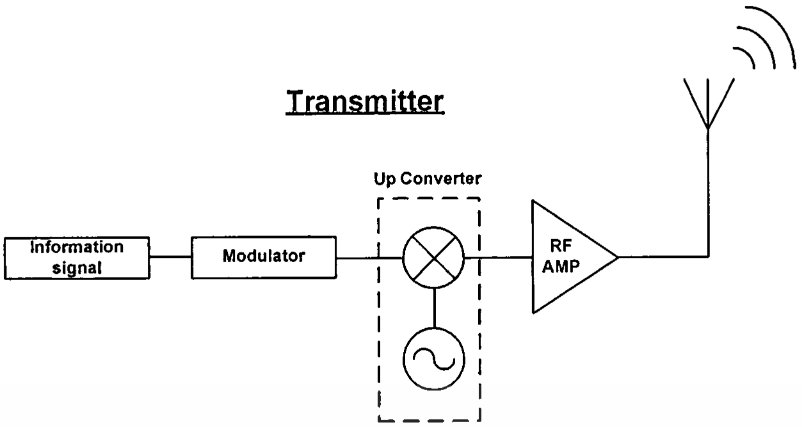
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่าจะเป็นระบบใดก็ตามต้องมีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 3 ส่วนด้วยกัน คือเครื่องส่งสัญญาณ (Transmitter) เครื่องรับสัญญาณ (Receiver) และช่องทางในการสื่อสาร (Communication channel system) ดังรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 ระบบการสื่อสารพื้นฐาน

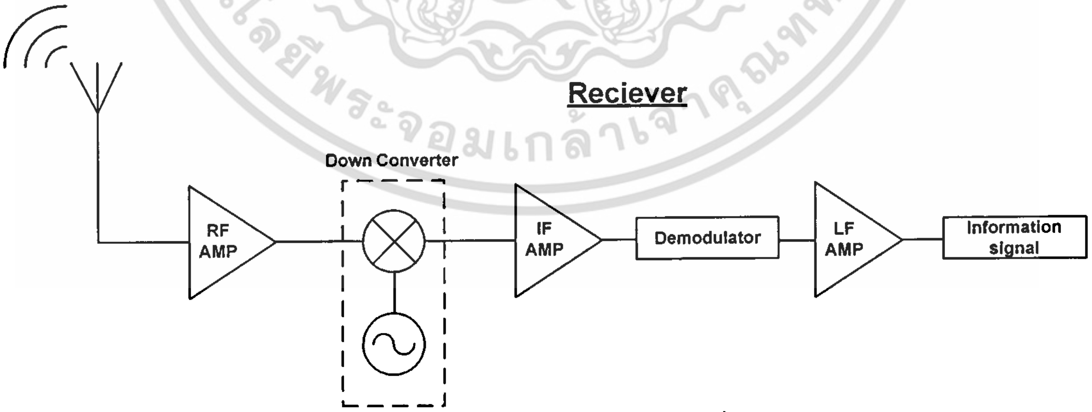
และเมื่อกล่าวถึงวิธีการรับส่งข้อมูลข่าวสารผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านช่องทางการสื่อสารที่เป็นอากาศสามารถนิยามการส่งข้อมูลแบบนี้ได้ว่าการสื่อสารไร้สาย[1] เช่น การสื่อสารออกอากาศวิทยุ (Radio broadcast communication) และการสื่อสารผ่านดาวเทียม (Satellite communication) เป็นต้น จากองค์ประกอบของระบบสื่อสารพื้นฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้นในส่วนของภาคส่งหรือเครื่องส่ง (Transmitter) สามารถแสดงแผนผังภาคส่งหรือเครื่องส่งของระบบการสื่อสารไร้สายได้ดังรูปที่ 2.2 โดยสัญญาณข่าวสารหรือข้อมูลที่ต้องการส่งได้ถูกเปลี่ยนจากสัญญาณกลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยตัวแปลงสัญญาณ เช่น ไมโครโฟนเป็นต้น หลังจากที่ได้สัญญาณไฟฟ้าที่ใช้แทนข่าวสารที่ต้องการส่งแล้ว สัญญาณนั้นได้ถูกส่งไปยังวงจรมอดูเลต (Modulate) เพื่อทำการมอดูเลตสัญญาณข่าวสารลงบนสัญญาณคลื่นพาห์ความถี่สูงซึ่งการมอดูเลตข่าวสารให้กับคลื่นพาห์แบ่งได้เป็น 3 แบบ[1] คือ การมอดูเลตทางขนาด (Amplitude modulation) การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency modulation) และการมอดูเลตทางเฟส (Phase modulation) โดยสัญญาณคลื่นพาห์ที่ถูกมอดูเลตแล้วไปผ่านวงจรผสมสัญญาณ (Frequency Mixer) เพื่อทำการย้ายย่านความถี่ขึ้นให้อยู่ในย่านความถี่ที่เหมาะสมในการส่งซึ่งอาศัยหลักการคูณความถี่ระหว่างความถี่มูลฐานจากวงจรกำเนิดสัญญาณกับความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห์ที่ถูกมอดูเลตแล้วจึงถูกขยายด้วยวงจรขยาย (Amplifier) เพื่อให้ได้ระดับแรงดันและกำลังที่สูงขึ้นที่ เพื่อให้เพียงพอต่อการส่งต่อไปให้แก่สายอากาศ (Antenna) และทำการส่งสัญญาณออกไปยังช่องทางการสื่อสารที่เป็นอากาศต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แผนผังแสดงภาคส่งของระบบการสื่อสารไร้สาย

ในส่วนของภาครับหรือเครื่องรับ (Receiver) สามารถแสดงแผนผังภาครับหรือเครื่องรับของระบบการสื่อสารไร้สายได้ดังรูปที่ 2.3 เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านอากาศมาจากภาคส่งหรือเครื่องส่งเดินทางมาถึงเครื่องรับ สายอากาศของภาครับหรือเครื่องรับทำการส่งสัญญาณข่าวสารที่ถูกมอดูเลตต่อไปให้แก่วงจรขยายเพราะสัญญาณที่รับเข้ามานั้นมีกำลังที่ต่ำมาก โดยวงจรขยายนี้ทำหน้าที่เลือกรับสัญญาณความถี่ซึ่งเลือกเฉพาะความถี่ที่ต้องการเท่านั้น แล้วไปผ่านวงจรผสมสัญญาณเพื่อย้ายย่านความถี่ลงให้เป็นความถี่กลางหรือความถี่คงที่ก่อน จากนั้นจึงจัดการสัญญาณทั้งการขยายสัญญาณต่อและแยกเอาสัญญาณข่าวสารจากความถี่กลางออกมาโดยผ่านวงจรดีมอดูเลต (Demodulator) เพื่อแปลงสัญญาณคลื่นพาห์ที่ถูกมอดูเลตกลับมาเป็นสัญญาณข่าวสารที่ต้องการดังเดิม



รูปที่ 2.3 แผนผังแสดงภาครับของระบบการสื่อสารไร้สาย

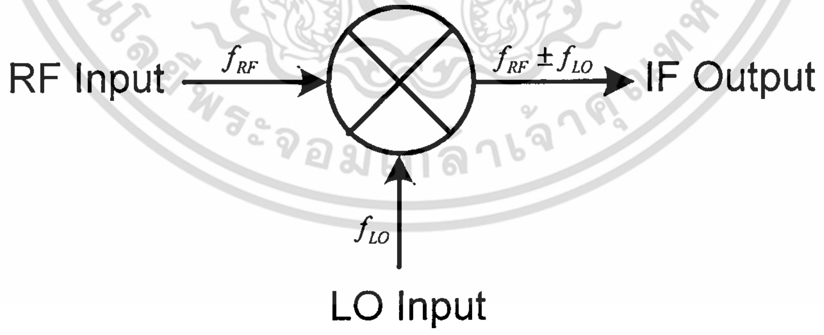
ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าทุกระบบการสื่อสารไร้สายไม่สามารถขาดองค์ประกอบสำคัญในเรื่องของการย้ายย่านความถี่ได้เลย เพราะในภาคส่งต้องมีการแปลงสัญญาณย่านความถี่ให้ขึ้นมาอยู่ในย่านความถี่ที่เหมาะสมในการส่ง และในภาครับต้องมีการแปลงสัญญาณย่านความถี่สูงให้ลงมาอยู่ในย่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่กลางเพื่อให้เหมาะสมต่อการรับสัญญาณข่าวสาร ฉะนั้นแล้วเพื่อให้การย้ายย่านความถี่ประสบผลมีความจำเป็นต้องอาศัยวงจรคูณและวงจรกำเนิดสัญญาณเป็นสำคัญ

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์

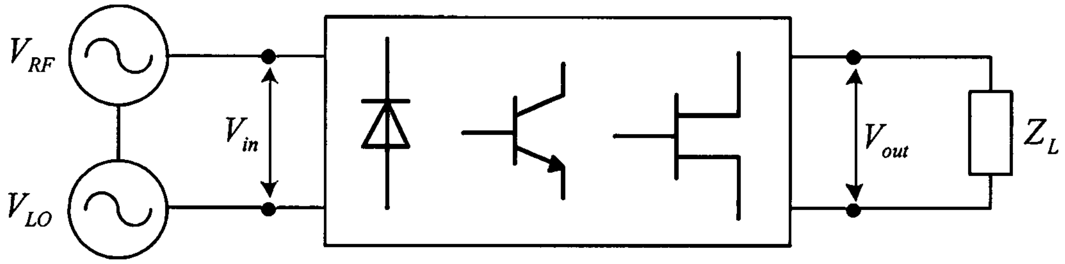
การย้ายย่านความถี่[2-4] ได้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสารไร้สายตั้งแต่นายเอ็ดวิน อาร์มสตรองได้ทำการคิดค้นเครื่องรับแบบซุปเปอร์เฮเทอโรดายน์ในปี ค.ศ.1918 โดยนายเอ็ดวิน อาร์มสตรองได้ใช้วงจรผสมสัญญาณหรือวงจรมิกเซอร์เป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับการย้ายย่านความถี่ในเครื่องรับแบบซุปเปอร์เฮเทอโรดายน์ สำหรับการสื่อสารไร้สายในยุคปัจจุบันได้มีการเติบโตและพัฒนาอย่างรวดเร็วซึ่งเห็นได้ว่าการย้ายย่านความถี่มีความจำเป็นและเป็นกุญแจสำคัญสำหรับการสื่อสารไร้สาย โดยทั่วไปแล้ววงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์ในอุดมคติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่สามารถแปลงสัญญาณจากความถี่หนึ่งไปยังอีกความถี่หนึ่งได้ เมื่อวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์ได้รับสัญญาณข่าวสารเข้ามาที่ขาอินพุต RF (Radio frequency) ที่ความถี่ f_{RF} ซึ่งถูกคูณกับสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณที่ขาอินพุต LO (Local oscillator) ที่ความถี่ f_{LO} และที่ขาเอาต์พุต IF (Intermediate frequency) จึงได้ความถี่ที่ถูกย้ายย่านความถี่ออกมาที่ความถี่ที่เป็นพจน์ผลบวก ($f_{RF}+f_{LO}$) และพจน์ผลต่าง ($f_{RF}-f_{LO}$) ระหว่างความถี่ของสัญญาณที่ขาอินพุตทั้งสอง ซึ่งความถี่ที่เป็นพจน์ผลบวกถูกเรียกว่าการย้ายย่านความถี่ขึ้น (Up-converter) และสำหรับพจน์ที่เป็นพจน์ผลต่างถูกเรียกว่าการย้ายย่านความถี่ลง (Down-converter)



รูปที่ 2.4 วงจรผสมสัญญาณในอุดมคติ

ในการย้ายย่านความถี่นั้นจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์เป็นต้น มาใช้ในการสร้างวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์ ดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 วงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์โดยใช้อุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น[3]

ด้วยความที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเหล่านี้สามารถทำให้สัญญาณสองสัญญาณเกิดการคูณกันได้หรือเกิดการย้ายย่านความถี่ได้นั่นเอง ซึ่งองค์ประกอบของวงจรที่ไม่เป็นเชิงเส้นเหล่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอนุกรมกำลังดังสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.1)

$$f(x)=\sum_{n=0}^{\infty}a_n x^n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \ldots \tag{2.1}$$

จากสมการอนุกรมกำลังในสมการ (2.1) สามารถนำมาอธิบายถึงหลักการทำงานของการย้ายย่านความถี่ได้ด้วยสมการคุณลักษณะเฉพาะของวงจรในเทอมของกระแสและแรงดันได้ดังสมการ (2.2) โดยที่ I คือ กระแส และ V คือ แรงดันของสัญญาณอินพุต

$$I(V)=a_1V+a_2V^2+a_3V^3+\ldots \tag{2.2}$$

กำหนดให้สัญญาณอินพุตสองสัญญาณที่ป้อนให้กับระบบเป็นดังสมการ (2.3)

$$V_{in}(t)=V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+V_{LO}\cos(\omega_{LO}t) \tag{2.3}$$

ทำการแทนค่า $V_{in}(t)$ จากสมการ (2.3) ลงในสมการ (2.2) จึงสามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็นดังสมการ (2.4)

$$\begin{aligned} I(V) &= a_1\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)\right) \\ &+a_2\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)\right)^2 \\ &+a_3\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)\right)^3+\ldots \end{aligned} \tag{2.4}$$

เมื่อพิจาณาเทอมที่หนึ่งของสมการ (2.4) สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.5) ซึ่งก็คือสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบที่ความถี่ ω_{RF} และ ω_{LO} หรือเรียกได้ว่าเป็นความถี่ฮาร์โมนิคที่หนึ่งของระบบ

$$a_1\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)\right)=a_1V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+a_1V_{LO}\cos(\omega_{LO}t) \tag{2.5}$$

จากสมการ (2.4) เมื่อพิจารณาที่เทอมที่สองจึงสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสิทธิ์ ... เพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_2\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)\right)^2 = \\ a_2\left[\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)\right)^2+2V_{RF}V_{LO}\cos(\omega_{RF}t)\cos(\omega_{LO}t)+\left(V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)\right)^2\right] \tag{2.6}$$

เมื่อนำทฤษฎีของตรีโกณมิติมาประยุกต์ใช้ในสมการ (2.6) สามารถแสดงผลของพจน์ความถี่ที่เกิดขึ้นได้ดังสมการ (2.7) โดยผลที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยพจน์ความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบที่ความถี่ $2\omega_{RF}$ และ $2\omega_{LO}$ หรือความถี่ที่เป็นความถี่ฮาร์โมนิคที่สองของระบบและพจน์ความถี่ที่ถูกย้ายย่านความถี่ซึ่งก็คือพจน์ผลบวก $\omega_{RF}+\omega_{LO}$ และพจน์ผลต่าง $\omega_{RF}-\omega_{LO}$

$$a_2\left[\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)\right)^2+2V_{RF}V_{LO}\cos(\omega_{RF}t)\cos(\omega_{LO}t)+\left(V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)\right)^2\right] \\ =\frac{a_2}{2}\begin{bmatrix} V_{RF}^2+V_{LO}^2+V_{RF}^2\cos(2\omega_{RF}t)+V_{LO}^2\cos(2\omega_{LO}t) \\ +2V_{RF}V_{LO}\left(\cos\left((\omega_{RF}+\omega_{LO})t\right)+\cos\left((\omega_{RF}-\omega_{LO})t\right)\right)\end{bmatrix} \tag{2.7}$$

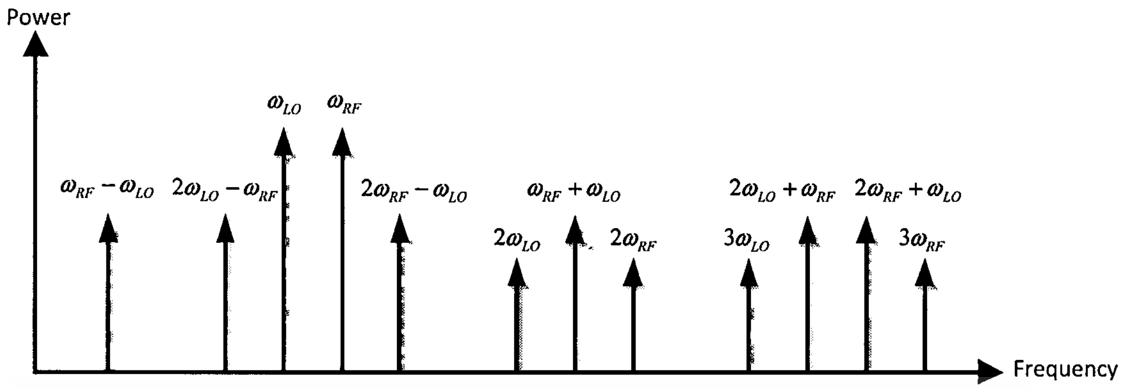
สำหรับในเทอมที่สามของสมการ (2.4) สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.8)

$$a_3\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)\right)^3 \\ =a_3\begin{bmatrix}\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)\right)^3+3V_{RF}V_{LO}^2\cos^2(\omega_{RF}t)\cos(\omega_{LO}t) \\ +3V_{RF}^2V_{LO}\cos(\omega_{RF}t)\cos^2(\omega_{LO}t)+\left(V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)\right)^3\end{bmatrix} \\ =\frac{a_3}{4}\begin{bmatrix} V_{RF}^3\cos(3\omega_{RF}t)+V_{LO}^3\cos(3\omega_{LO}t) \\ +3V_{RF}^2V_{LO}\left(\cos\left((2\omega_{RF}+\omega_{LO})t\right)+\cos\left((2\omega_{RF}-\omega_{LO})t\right)\right) \\ +3V_{RF}V_{LO}^2\left(\cos\left((2\omega_{LO}+\omega_{RF})t\right)+\cos\left((2\omega_{LO}-\omega_{RF})t\right)\right) \\ +3\left(V_{RF}^3+2V_{RF}V_{LO}^2\right)\cos(\omega_{RF}t)+3\left(V_{LO}^3+2V_{RF}^2V_{LO}\right)\cos(3\omega_{LO}t)\end{bmatrix} \tag{2.8}$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อนำทฤษฎีของตรีโกณมิติมาประยุกต์ใช้ในสมการ (2.8) สามารถแสดงผลของพจน์ความถี่ที่เกิดขึ้นได้ โดยผลที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยพจน์ความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบที่ความถี่ $3\omega_{RF}$ และ $3\omega_{LO}$ หรือความถี่ที่เป็นความถี่ฮาร์โมนิคที่สามของระบบและพจน์ความถี่ที่ถูกย้ายย่านความถี่ซึ่งก็คือพจน์ผลบวก ($2\omega_{RF}+\omega_{LO}$, $2\omega_{LO}+\omega_{RF}$) และพจน์ผลต่าง ($2\omega_{RF}-\omega_{LO}$, $2\omega_{LO}-\omega_{RF}$)

เมื่อทำการรวมทุกเทอมจากสมการ (2.5), (2.7) และ (2.8) สามารถแสดงองค์ประกอบทางความถี่ที่ได้จากความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์ได้ดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 สเปคตรัมทางความถี่ของวงจรผสมสัญญาณ

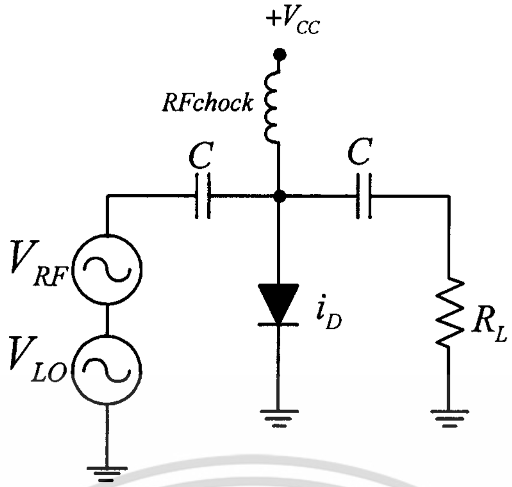
2.4 วงจรผสมสัญญาณ

สำหรับการสร้างวงจรผสมสัญญาณนั้นมีอยู่หลากหลายวิธีด้วยกัน โดยจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นเป็นสำคัญเพื่อให้เกิดการย้ายย่านความถี่ ซึ่งอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างวงจรผสมสัญญาณ[2-4] ได้แก่ ไดโอด ทรานซิสเตอร์แบบสองรอยต่อ (BJT) และทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า (FET) เป็นต้น เห็นได้ว่าในวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์นั้นมีหลากหลายชนิดมาก หนึ่งในวิธีสำหรับจำแนกประเภทของวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์สามารถแยกได้โดยใช้โครงสร้างพื้นฐานของวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์ ซึ่งสามารถแยกประเภทได้ 3 ประเภท คือ วงจรผสมสัญญาณแบบเดี่ยว (Single-ended mixer) วงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลเดี่ยว (Single balanced mixer) และวงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลคู่ (Double balanced mixer)

2.4.1 วงจรผสมสัญญาณแบบเดี่ยว

วงจรผสมสัญญาณแบบเดี่ยวเป็นวงจรผสมสัญญาณที่สามารถสร้างได้ง่าย ใช้กำลังงานสำหรับสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณไม่มากและราคาถูกเนื่องจากใช้อุปกรณ์เพียงตัวเดียวแต่มีประสิทธิภาพในการย้ายย่านความถี่ต่ำเมื่อเทียบกับวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์ประเภทอื่น สำหรับวงจรผสมสัญญาณแบบเดี่ยวโดยใช้ไดโอดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไดโอดแบบเดี่ยว

จากความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ประเภทไดโอด ซึ่งสามารถแสดงสมการคุณลักษณะเฉพาะของช็อตกี้ไดโอดในเทอมกระแสและแรงดันได้ดังสมการ (2.9) โดยที่ I_D คือกระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอด , I_S คือกระแสอิ่มตัวเมื่อทำการไบอัสกลับ, q คือประจุของอิเล็กตรอน, K คือค่าคงที่ของโบลต์มานน์ , T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ และ η คือค่าตัวประกอบอุดมคติ

$$I_D = I_S\left(e^{(qV_D/\eta KT)}-1\right) \approx I_S\left(e^{(qV_D/\eta KT)}\right) \qquad (2.9)$$

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณความถี่วิทยุที่ความถี่ ω_{RF} และสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ ω_{LO} ได้ดังสมการ (2.10)

$$V_{in}(t) = V_{RF}\cos(\omega_{RF}t) + V_{LO}\cos(\omega_{LO}t) \qquad (2.10)$$

จากความสัมพันธ์ของอนุกรมกำลังกับฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.11)

$$e^x = \sum_{n=o}^{\infty}\frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + ... + \frac{x^n}{n!} \qquad (2.11)$$

จากสมการ (2.12) เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับสมการ (2.9) สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.12)

$$I_D(V) = a_1V + a_2V^2 + a_3V^3 + ... \qquad (2.12)$$

เมื่อนำ $V_{in}(t)$ จากสมการ (2.10) มาแทนค่าในสมการ (2.12) สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_D = \begin{pmatrix} (V_{RF}\cos(\omega_{RF}t) + V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)) \\ + \dfrac{(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t) + V_{LO}\cos(\omega_{LO}t))^2}{2} + ... \end{pmatrix} \tag{2.13}$$

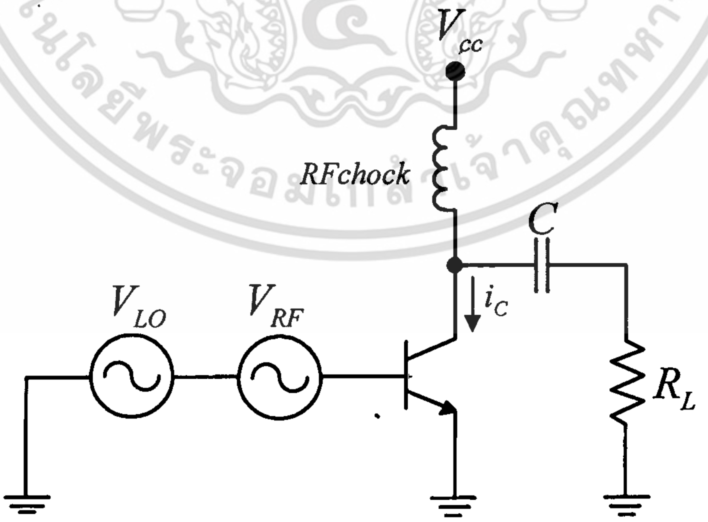
จากสมการ (2.13) ทำการพิจาณาในเทอมที่เป็นพจน์กำลังสอง สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.14)

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2}\left[V_{RF}\cos(\omega_{RF}t) + V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)\right]^2 = \\ &\frac{1}{2}\left[\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)\right)^2 + 2V_{RF}V_{LO}\cos(\omega_{RF}t)\cos(\omega_{LO}t) + \left(V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)\right)^2\right] \end{aligned} \tag{2.14}$$

จากสมการ (2.14) เมื่อนำทฤษฎีของตรีโกณมิติมาประยุกต์ใช้สามารถแสดงพจน์ความถี่ที่เป็นพจน์ผลรวมหรือพจน์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น ($\omega_{RF} + \omega_{LO}$) และพจน์ผลต่างหรือพจน์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง ($\omega_{RF} - \omega_{LO}$) ได้ดังสมการ (2.15)

$$\begin{aligned} &2V_{RF}V_{LO}\cos(\omega_{RF}t)\cos(\omega_{LO}t) = \\ &V_{RF}V_{LO}\left(\cos\left((\omega_{RF} + \omega_{LO})t\right) + \cos\left((\omega_{RF} - \omega_{LO})t\right)\right) \end{aligned} \tag{2.15}$$

ในส่วนของอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นนอกจากไดโอดแล้วยังมีอุปกรณ์จำพวกทรานซิสเตอร์ที่สามารถนำมาสร้างเป็นวงจรผสมสัญญาณแบบเดี่ยวได้ สำหรับวงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบเดี่ยวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบเดี่ยว

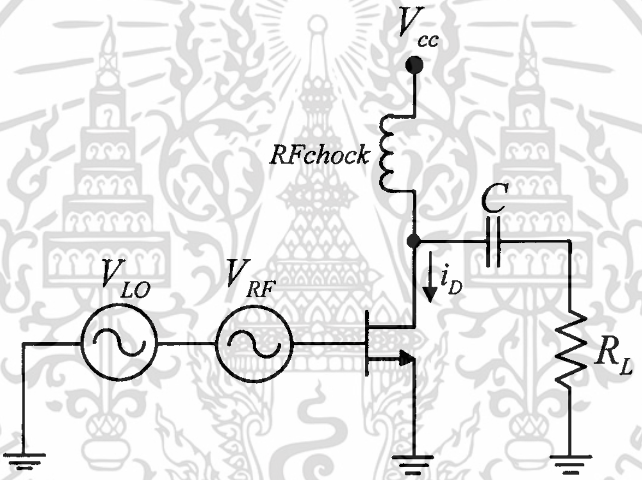
สามารถแสดงสมการคุณลักษณะเฉพาะของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ได้ดังสมการ (2.16) โดยที่ I_C คือกระแสที่ขาคอลเลคเตอร์, I_S คือกระแสอิ่มตัวเมื่อทำการไบอัส, V_{BE} คือแรงดันที่ขาเบส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปขาอิมิตเตอร์และ V_T คือค่าแรงดันจากอุณหภูมิความร้อน

$$I_C = I_s e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \tag{2.16}$$

เมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบเดี่ยวดังรูปที่ 2.8 และทำการวิเคราะห์ในทำนองเดียวกันกับวงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไดโอดแบบสมดุลเดี่ยว เมื่อนำทฤษฎีของตรีโกณมิติมาประยุกต์ใช้สามารถแสดงพจน์ความถี่ที่เป็นพจน์ผลรวมหรือพจน์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น ($\omega_{RF} + \omega_{LO}$) และพจน์ผลต่างหรือพจน์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง ($\omega_{RF} - \omega_{LO}$) ได้เช่นเดียวกับสมการ (2.15) สำหรับวงจรผสมสัญญาณโดยใช้เฟ็ตทรานซิสเตอร์แบบเดี่ยวสามารถแสดงได้ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรผสมสัญญาณโดยใช้เฟ็ตทรานซิสเตอร์แบบเดี่ยว

สามารถแสดงสมการคุณลักษณะเฉพาะของเฟ็ตทรานซิสเตอร์ในเทอมกระแสและแรงดันได้ดังสมการ (2.17) โดยที่ i_D คือกระแสที่ขาเดรน, V_{GS} คือค่าแรงดันที่ขาเกตไปขาซอร์ต และ V_T คือค่าแรงดันจากอุณหภูมิความร้อน

$$i_D = \beta_n \left(V_{GS} - V_T\right)^2 \tag{2.17}$$

โดยที่ $\beta_n = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}$

เมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรผสมสัญญาณโดยใช้เฟ็ตทรานซิสเตอร์แบบเดี่ยวดังรูปที่ 2.9 ซึ่งสามารถแสดงสมการ (2.17) ได้ใหม่เป็นดังสมการ (2.18)

$$i_D = \beta_n \left(V_G + V_{RF}\cos(\omega_{RF}t) + V_{LO}\cos(\omega_{LO}t) - V_T\right)^2 \tag{2.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการคูณกระจายสมการทางฝั่งขวาของสมการ (2.18) สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.19)

$$\begin{aligned}&\beta_n\left(V_G+V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)-V_T\right)^2=\\&\beta_n\begin{bmatrix}(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+V_{LO}\cos(\omega_{LO}t))^2+(V_G-V_T)^2\\+2(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+V_{LO}\cos(\omega_{LO}t))(V_G-V_T)\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{2.19}$$

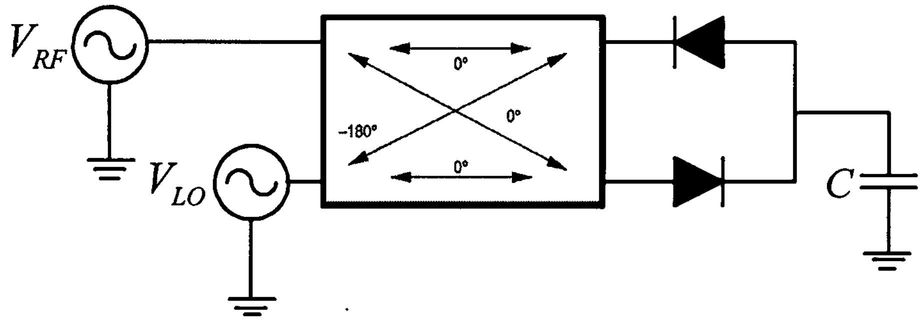
จากสมการฝั่งขวาของสมการ (2.19) เมื่อนำทฤษฎีของตรีโกณมิติมาประยุกต์ใช้สามารถแสดงพจน์ความถี่ที่เป็นพจน์ผลรวมหรือพจน์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น ($\omega_{RF}+\omega_{LO}$) และพจน์ผลต่างหรือพจน์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง ($\omega_{RF}-\omega_{LO}$) ได้ดังสมการ (2.20)

$$\begin{aligned}&\beta_n\begin{bmatrix}(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+V_{LO}\cos(\omega_{LO}t))^2+(V_G-V_T)^2\\+2(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)+V_{LO}\cos(\omega_{LO}t))(V_G-V_T)\end{bmatrix}=\\&\beta_n\begin{bmatrix}V_{RF}^2+V_{LO}^2+V_{RF}^2\cos(2\omega_{RF}t)+V_{LO}^2\cos(2\omega_{LO}t)\\+V_{RF}V_{LO}\left(\cos\left((\omega_{RF}+\omega_{LO})t\right)+\cos\left((\omega_{RF}-\omega_{LO})t\right)\right)\\+(V_G-V_T)^2+2V_{RF}\cos(\omega_{RF}t)(V_G-V_T)\\+2V_{LO}\cos(\omega_{LO}t)(V_G-V_T)\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{2.20}$$

2.4.2 วงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลเดี่ยว

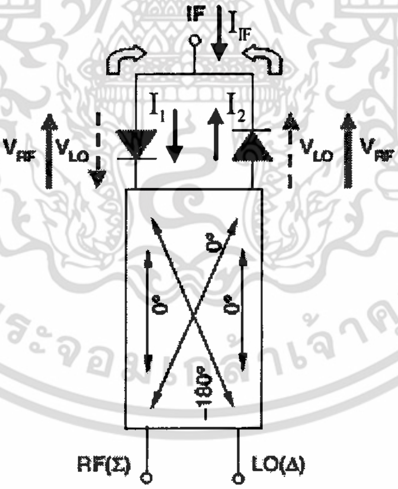
วงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลเดี่ยวประกอบไปด้วยวงจรผสมสัญญาณแบบเดี่ยวจำนวนสองวงจรมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยใช้ไฮบริดจ์คลัปเปลอร์ในการแยกสัญญาณระหว่างสัญญาณอินพุตทั้งสองคือสัญญาณความถี่วิทยุ V_{RF} และสัญญาณความถี่จากวงจรกำเนิดสัญญาณ V_{LO} เนื่องจากในวงจรผสมสัญญาณแบบเดี่ยวนั้นมีความยากในการเลือกกรองสัญญาณสำหรับวงจรกรองความถี่ ซึ่งในส่วนของวงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลเดี่ยวสามารถแก้ไขข้อเสียในจุดนี้ได้เพราะสามารถลดทอนกำลังงานของสัญญาณที่ไม่ต้องการได้อีกด้วย แต่ต้องใช้กำลังงานสำหรับสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณสูงกว่าวงจรผสมสัญญาณแบบเดี่ยว โดยโครงสร้างพื้นฐานของวงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลเดี่ยวสามารถแสดงได้ดังรูป 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไดโอดแบบสมดุลเดี่ยว[2]

จากรูปที่ 2.10 เมื่อสัญญาณอินพุตทั้งสองสัญญาณถูกป้อนให้กับวงจรไฮบริดจ์คลัปเปลอร์ โดยอินพุตที่เป็นสัญญาณความถี่จากวงจรกำเนิดสัญญาณนั้นได้ถูกแบ่งออกเท่าๆกันแต่สัญญาณที่ได้ออกมามีความต่างเฟสอยู่ 180 องศา โดยที่สัญญาณที่ป้อนให้กับไดโอด D_1 มีเฟสอยู่ที่ 0 องศา ในส่วนของไดโอด D_2 มีเฟสอยู่ที่ 180 องศา สำหรับสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณความถี่วิทยุซึ่งถูกแบ่งเป็นสองสัญญาณเช่นกัน แต่เฟสเหมือนกัน โดยสัญญาณที่ป้อนให้กับไดโอดสามารถแสดงได้ดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 การวิเคราะห์วงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไดโอดแบบสมดุลเดี่ยว[2]

ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาวงจรจากรูปที่ 2.11 ที่ขาเอาต์พุต I_{IF} สามารถเขียนสมการเอาต์พุตในเทอมกระแสได้ดังสมการ (2.21)

$$I_{IF} = I_1 - I_2 \tag{2.21}$$

โดยกระแสที่ผ่านไดโอด D_1 และ D_2 สามารถแสดงสมการกระแสในเทอมแรงดันได้ดังสมการ (2.22) และ (2.23)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$I_1 = a_1V_1 + a_2V_1^2 + a_3V_1^3 + \dots \tag{2.22}$$

$$I_2 = -a_1V_2 + a_2V_2^2 - a_3V_2^3 + \dots \tag{2.23}$$

และสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับไดโอดสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.24) และ (2.25)

$$V_1(t) = V_{RF}\cos(\omega_{RF}t + 0^\circ) + V_{LO}\cos(\omega_{LO}t + 180^\circ) \tag{2.24}$$

$$V_2(t) = V_{RF}\cos(\omega_{RF}t + 0^\circ) + V_{LO}\cos(\omega_{LO}t + 0^\circ) \tag{2.25}$$

เมื่อนำสมการ (2.24) และ (2.25) ไปแทนในสมการ (2.22) และ (2.23) สามารถแสดงสมการกระแสที่ผ่านไดโอด D_1 และ D_2 ได้ดังสมการ (2.26) และ (2.27)

$$\begin{aligned} I_1 &= a_1\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t + 0^\circ) + V_{LO}\cos(\omega_{LO}t + 180^\circ)\right) \\ &+ a_2\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t + 0^\circ) + V_{LO}\cos(\omega_{LO}t + 180^\circ)\right)^2 \end{aligned} \tag{2.26}$$

$$\begin{aligned} I_2 &= -a_1\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t + 0^\circ) + V_{LO}\cos(\omega_{LO}t + 0^\circ)\right) \\ &+ a_2\left(V_{RF}\cos(\omega_{RF}t + 0^\circ) + V_{LO}\cos(\omega_{LO}t + 0^\circ)\right)^2 \end{aligned} \tag{2.27}$$

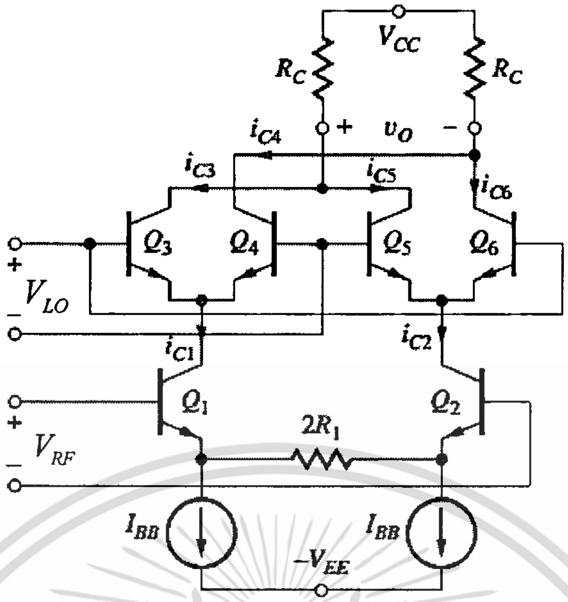
จากสมการ (2.21) เมื่อทำการแทนค่าสมการ (2.26) และ (2.27) และเมื่อนำทฤษฎีของตรีโกณมิติมาประยุกต์ใช้สามารถแสดงพจน์ความถี่ที่เป็นพจน์ผลรวมหรือพจน์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น ($\omega_{RF} + \omega_{LO}$) และพจน์ผลต่างหรือพจน์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง ($\omega_{RF} - \omega_{LO}$) ได้ดังสมการ (2.28)

$$I_{IF} = \left[2a_1V_{RF}\cos(\omega_{RF}t) - 2a_2\left(V_{RF}V_{LO}\left(\cos\left((\omega_{RF} \pm \omega_{LO})t\right)\right)\right)\right] \tag{2.28}$$

2.4.3 วงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลคู่

สำหรับวงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลคู่ ประกอบไปด้วยวงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลเดี่ยวจำนวนสองวงจรมาประกอบเข้าด้วยกันทำให้วงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลคู่มีความซับซ้อนมากกว่าและใช้กำลังงานสำหรับสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณมากกว่าวงจรผสมสัญญาณประเภทอื่นด้วย แต่ข้อดีของวงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลคู่สามารถลดทอนกำลังงานของพจน์ความถี่ที่ไม่ต้องการได้มากกว่าวงจรผสมสัญญาณประเภทอื่นซึ่งง่ายต่อการกรองความถี่สำหรับวงจรกรองความถี่ สำหรับวงจรผสมสัญญาณแบบสมดุลคู่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และระบุอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
138784



รูปที่ 2.12 วงจรผสมสัญญาณโดยใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบสมดุลคู่[12]

จากรูปที่ 2.12 ทรานซิสเตอร์ Q_3 ถึง Q_6 ถูกป้อนสัญญาณอินพุตด้วยสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ ω_{LO} และที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ถูกป้อนสัญญาณอินพุตด้วยสัญญาณจากความถี่วิทยุที่ความถี่ ω_{RF} ดังนั้นสามารถแสดงกระแสที่ผ่านขาคอลเลคเตอร์ที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ได้ดังสมการ (2.29) และ (2.30)

$$I_{C1} = I_{BB} + \frac{V_{RF}}{2R_1}\cos(\omega_{RF}t) \tag{2.29}$$

$$I_{C2} = I_{BB} - \frac{V_{RF}}{2R_1}\cos(\omega_{RF}t) \tag{2.30}$$

สำหรับคู่ทรานซิสเตอร์ Q_3 , Q_4 และ Q_5 , Q_6 สามารถเขียนสัญญาณเอาต์พุตที่ขาคอลเลคเตอร์ได้ดังสมการ (2.31) และ (2.32)

$$\Delta I_{out} = \frac{V_{RF}R_C}{2R_1}\left[\cos(\omega_{RF}t)\cos(\omega_{LO}t)\right] \tag{2.31}$$

$$\Delta I_{out} = \frac{V_{RF}R_C}{4R_1}\left[\cos(\omega_{RF}t - \omega_{LO}t) + \cos(\omega_{RF}t + \omega_{LO}t)\right] \tag{2.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้น

วงจรกำเนิดสัญญาณ (Oscillator) เป็นวงจรที่มีความสำคัญและใช้งานกันอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสารโทรคมนาคม อิเล็กทรอนิกส์ แมคคานิกส์ หรือแม้แต่การเต้นของหัวใจของคนและสัตว์ ก็จัดได้ว่าเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณประเภทหนึ่ง ดังนั้นความเข้าใจพื้นฐานของพฤติกรรมของการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณจึงมีความจำเป็นต่อวิศวกรไฟฟ้าอย่างยิ่ง [10,11]

โดยทั่วไปแล้ววงจรกำเนิดสัญญาณนั้นสามารถทำงานได้โดยไม่มีความจำเป็นที่ต้องป้อนอินพุตให้กับระบบโดยจะสามารถผลิตความถี่ออกมาได้ตลอดเวลาและขนาดคงที่ เนื่องจากอาศัยการป้อนกลับจากเอาต์พุตมายังอินพุต ซึ่งวงจรกำเนิดสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆด้วยกันคือวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้น (Linear oscillator) และวงจรกำเนิดสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear oscillator) ซึ่งได้แก่สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangular) และสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Square) เป็นต้น

ในการอธิบายระบบการกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้นใดๆนั้น[11] สามารถอธิบายได้โดยสมการอนุพันธ์ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งนำมาใช้ในการอธิบายถึงคุณลักษณะของระบบเชิงไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่แล้วในการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับสองนั้น ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของระบบได้ดังรูปที่ 2.13

$$x(\tau)\rightarrow \boxed{a_2\frac{d^2}{dt^2}v(t)+a_1\frac{d}{dt}v(t)+a_0v(t)=0}\rightarrow v(t,\tau)$$

รูปที่ 2.13 แผนภาพบล็อกแสดงแบบจำลองของระบบอันดับที่สอง

โดยที่ $x(\tau)$ คือสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบและ $v(t)$ คือสัญญาณเอาต์พุตของระบบ โดยในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ในกรณีที่ไม่มีอินพุตเข้ามาในระบบหรือกล่าวได้ว่า $x(\tau)=0$ นั่นเอง ซึ่งทำให้สามารถแสดงสมการของระบบได้ดังสมการ (2.33)

$$a_2\frac{d^2}{dt^2}v(t)+a_1\frac{d}{dt}v(t)+a_0v(t)=0 \tag{2.33}$$

โดยที่ a_2,a_1 และ a_0 เป็นจำนวนจริงใดๆ สำหรับในสมการ (2.33) นั้นเป็นสมการอนุพันธ์อันดับสอง ซึ่งในสมการอนุพันธ์นั้น การให้ค่าคำตอบหรือผลลัพธ์ออกมาขึ้นอยู่กับค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ถ้าเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นศูนย์ ค่าเอาต์พุตหรือผลตอบสนองก็เป็นศูนย์ไปด้วย เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบนี้สามารถให้กำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ออกมาได้ จึงได้ทำการแก้สมการ (2.33) โดยทำการสมมุติค่าคำตอบเป็นดังสมการ (2.34)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v(t) = v_n(t) = Ke^{mt} \tag{2.34}$$

ทำการแทนค่า $v_n(t)$ ลงในสมการ (2.33) จึงสามารถแสดงสมการได้ใหม่ดังสมการ (2.35) และ (2.36)

$$a_2m^2Ke^{mt} + a_1mKe^{mt} + a_0Ke^{mt} = 0 \tag{2.35}$$

$$a_2m^2 + a_1m + a_0 = 0 \tag{2.36}$$

จากสมการ (2.36) สามารถหาค่าคำตอบสมบูรณ์ได้โดยแก้สมการหาค่า m โดยค่าคำตอบสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.37)

$$m_{1,2} = \frac{\left(-a_1 \pm j\sqrt{a_1^2 - 4a_0a_2}\right)}{2a_2} \tag{2.37}$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการ (2.37) ใหม่สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.38)

$$m_{1,2} = \frac{\left(-a_1 \pm j\sqrt{4a_0a_2 - a_1^2}\right)}{2a_2} \tag{2.38}$$

เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงกำหนดให้ค่า $\frac{a_1}{2a_2} = \alpha$ และ $\frac{\sqrt{4a_0a_2 - a_1^2}}{2a_2} = \omega_n$ ดังนั้นจึงแสดงสมการ (2.38) ได้ใหม่ดังสมการ (2.39)

$$m_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_n \tag{2.39}$$

ดังนั้นจึงได้ค่าคำตอบของสมการอนุพันธ์ที่เป็นผลตอบสนองธรรมชาติดังสมการ (2.40) โดยที่ค่า K_1 และ K_2 เป็นค่าคงที่

$$v_n(t) = K_1e^{m_1t} + K_2e^{m_2t} \tag{2.40}$$

ถ้าพิจารณาสมการ (2.40) เห็นได้ว่า $m_2 = m_1^*$ โดยที่ m_2 คือค่าสังยุคของ m_1 และเมื่อแทนค่า m_2 ลงในสมการ (2.40) จึงสามารถแสดงสมการได้ใหม่ดังสมการ (2.41)

$$v_n(t) = K_1e^{m_1t} + K_2e^{m_1^*t} \tag{2.41}$$

ในกรณีที่ค่าคำตอบของผลตอบสนองธรรมชาติ $v_n(t)$ เป็นจำนวนจริง จึงสมมุติให้ค่าของ K_1 และ K_2 เป็นไปได้ทั้งในกรณีของจำนวนเชิงซ้อนและจำนวนจริง สำหรับกรณีที่ค่า K_1 และ K_2 เป็นจำนวนเชิงซ้อนจึงสมมุติให้ $K_1 = a_1 + jb_1$ และ $K_2 = a_2 + jb_2$ จึงสามารถเขียนสมการ (2.41) ได้ใหม่ดังสมการ (2.42)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_n(t) = (a_1 + jb_1)e^{m_1 t} + (a_2 + jb_2)e^{m_1^* t}$$
$$= \left(a_1 e^{m_1 t} + a_2 e^{m_1^* t}\right) + j\left(b_1 e^{m_1 t} + b_2 e^{m_1^* t}\right) \quad (2.42)$$

ในสมการ (2.42) สำหรับค่าคำตอบของผลตอบสนองธรรมชาติ $v_n(t)$ ที่เป็นจำนวนจริง ค่าของ $a_1 = a_2$ และ $b_1 = -b_2$ เมื่อประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ของออยเลอร์คือ $\cos(\theta) = \dfrac{e^{j\theta} + e^{-j\theta}}{2}$ และ $\sin(\theta) = \dfrac{e^{j\theta} - e^{-j\theta}}{2j}$ จึงทำให้ได้ค่าผลตอบสนองธรรมชาติ $v_n(t)$ สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.43)

$$v_n(t) = 2a_1 e^{-\alpha t}\cos(\omega_n t) - 2b_1 e^{-\alpha t}\sin(\omega_n t) \quad (2.43)$$

สำหรับในกรณีที่ค่า K_1 และ K_2 เป็นจำนวนจริงที่มีค่าเท่ากัน จากสมการ (2.41) เนื่องจากค่า $e^{m_1 t}$ และ $e^{m_1^* t}$ เป็นจำนวนเชิงซ้อนที่เป็นคู่สังยุคกัน เมื่อนำมาบวกกันจึงได้เป็นจำนวนจริง จึงทำให้ค่าคำตอบของผลตอบสนองธรรมชาติ $v_n(t)$ เป็นจำนวนจริงไปด้วย เมื่อให้ค่า $K_1 = K_2 = K_x$ จึงจัดรูปสมการ (2.41) ได้ใหม่ดังสมการ (2.44)

$$v_n(t) = K_x\left(e^{m_1 t} + e^{m_1^* t}\right) = 2K_x e^{-\alpha t}\cos(\omega_n t) \quad (2.44)$$

ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าค่าคำตอบของผลตอบสนองธรรมชาติ $v_n(t)$ ในสมการ (2.44) เป็นค่าจำนวนจริงที่เป็นฟังก์ชันคลื่นรูปไซน์ โดยมีค่าความถี่เท่ากับ ω_n เรเดียนต่อวินาที ซึ่งมีขนาดเท่ากับ $2K_x e^{-\alpha t}$ ในกรณีที่ $v_n(t)$ เป็นฟังก์ชั่นรูปไซน์ที่มีขนาดคงที่ ค่าของ $e^{-\alpha t}$ ต้องเป็นค่าคงที่ โดยมีแค่กรณีเดียวเท่านั้นที่สามารถทำให้ค่า $e^{-\alpha t}$ เป็นค่าคงที่ได้นั่นคือ $e^{-\alpha t} = e^0 = 1$ นั่นหมายความว่าค่า α ต้องมีค่าเป็นศูนย์และเนื่องจาก $\alpha = \dfrac{a_1}{2a_2}$ ดังนั้นค่า a_1 จึงต้องมีค่าเป็นศูนย์ไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ (2.33) ได้ใหม่ดังสมการ (2.45)

$$a_2 \frac{d^2}{dt^2} v(t) + a_0 v(t) = 0 \quad (2.45)$$

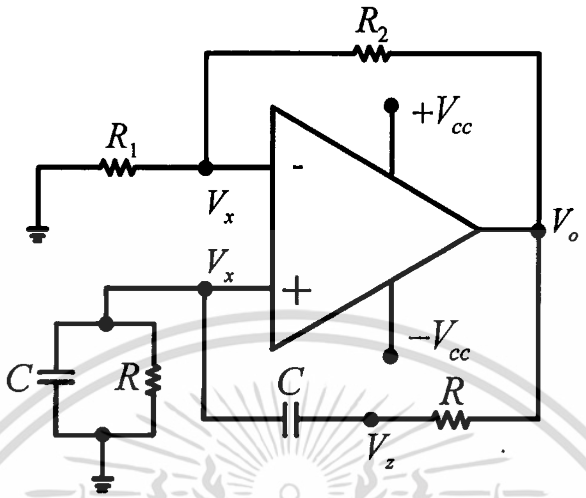
ทำให้ได้ค่าคำตอบ $v_n(t)$ ของสมการ (2.45) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.46)

$$v(t) = v_n(t) = 2K_x\cos(\omega_n t) \quad (2.46)$$

สังเกตในสมการ (2.46) ได้ว่าผลตอบสนองสมบูรณ์ที่ได้ในกรณีที่ไม่มีอินพุตภายนอกเข้ามาป้อนให้ระบบนั้น มีลักษณะเป็นฟังก์ชันรูปไซน์ที่มีขนาดคงที่ ณ เวลาใดๆ สำหรับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยกตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้นที่มีการใช้งานจริง จึงได้ยกตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์

เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรจากรูปที่ 2.14 ด้วยการวิเคราะห์โหนดที่จุดรวม V_x และ V_z ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ใน S - domain จึงได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการ (2.47),(2.48) และ (2.49) ตามลำดับโดยที่ V_x คือแรงดันที่ขาลบและขาบวกของออป-แอมป์และ V_o คือ แรงดันที่ขาเอาต์พุต

$$\left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\right)V_x(s)-\frac{V_o(s)}{R_2}=0 \tag{2.47}$$

$$\frac{2V_x(s)-V_z(s)}{R}+sCV_x(s)=0 \tag{2.48}$$

$$\frac{V_z(s)-V_x(s)}{R}+sC\big(V_z(s)-V_o(s)\big)=0 \tag{2.49}$$

จากสมการ (2.47) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_x ได้ดังสมการ (2.50)

$$V_x(s)=\left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)V_o(s) \tag{2.50}$$

จากสมการ (2.48) จึงสามารถหาสมการแรงดันรวม V_z ได้ดังสมการ (2.51)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_z(s)=\left(\frac{2R_1+sR_1RC}{R_1+R_2}\right)V_o(s) \quad (2.51)$$

จากสมการ (2.49) เมื่อทำการแทนค่า V_x และ V_z แล้วจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_o ได้ดังสมการ (2.52)

$$s^2R_1R^2C^2V_o(s)+s\left(2R_1RC-R_2RC\right)V_o(s)+R_1V_o(s)=0 \quad (2.52)$$

เมื่อทำการแปลงลาปลาซผกผันจากสมการ(2.52) เพื่อทำการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาจึงสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.53)

$$R_1R^2C^2v_o''(t)+\left(2R_1RC-R_2RC\right)v_o'(t)+R_1v_o(t)=0 \quad (2.53)$$

จากสมการ (2.53) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธ์กับสมการอนุพันธ์อันดับสองจากสมการ (2.33) พบว่าค่าสัมประสิทธ์

$a_2=R_1R^2C^2$

$a_1=\left(2R_1RC-R_2RC\right)$

$a_0=R_1$

เพื่อทำให้วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์สามารถออสซิลเลตเป็นสัญญาณไซนูซอยดอลได้นั้นค่าสัมประสิทธ์ a_1 ของระบบต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ดังสมการ (2.54)

$$a_1=2R_1RC-R_2RC=0 \quad (2.54)$$

จากสมการ (2.54) สามารถหาค่าเงื่อนไขในการออสซิลเลตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ได้คือ $R_2=2R_1$ และเมื่อทำการแทนค่าเงื่อนไขลงในสมการ (2.53) จึงสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการ (2.55)

$$R_1R^2C^2v_o''(t)+R_1v_o(t)=0 \quad (2.55)$$

จากสมการ (2.55) เมื่อนำ $R_1R^2C^2$ หารตลอดทั้งสมการและแทนค่าผลเฉลยคำตอบ $v_o(t)=Ae^{mt}$ จึงสามารถเขียนสมการคุณลักษณะเฉพาะได้ดังสมการ (2.56)

$$m^2+\frac{1}{R^2C^2}=0 \quad (2.56)$$

เมื่อทำการแก้สมการ (2.56) และทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถหาค่าคำตอบได้ดังสมการ (2.57)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_{1,2} = \pm\sqrt{\frac{1}{R^2C^2}}j \tag{2.57}$$

และสามารถแสดงค่าคำตอบของผลตอบสนองสมบูรณ์ $v_o(t)$ ได้ดังสมการ (2.58)

$$v_o(t) = v_n(t) = A_1e^{m_1t} + A_2e^{m_2t} = A_1e^{j\frac{t}{RC}} + A_2e^{-j\frac{t}{RC}} \tag{2.58}$$

โดยที่ A_1 และ A_2 เป็นค่าคงที่ ในกรณีที่ $v_o(t)$ เป็นจำนวนจริง จึงให้ $A_1 = A_2 = A_x$ ทำให้สามารถเขียนสมการ (2.58) ได้ใหม่ดังสมการ (2.59)

$$v_n(t) = A_xe^{j\frac{t}{RC}} + A_xe^{-j\frac{t}{RC}} = 2A_x\cos\left(\frac{t}{RC}\right) \tag{2.59}$$

จากสมการ (2.59) สามารถแสดงค่าความถี่ที่ถูกผลิตออกมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากอินพุตบังคับได้ดังสมการ (2.60)

$$f_{LO} = \frac{1}{2\pi RC} \tag{2.60}$$

2.6 การวิเคราะห์ระบบด้วยเทคนิคตัวแปรเวลาหลายตัว

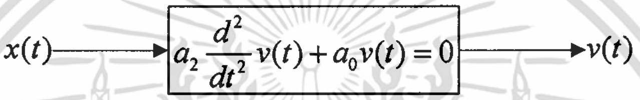
การวิเคราะห์ระบบเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในโดเมนทางเวลานั้น มักอาศัยสมมุติฐานที่ว่าระบบเป็นแบบเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (LTI: Linear Time Invariant) สำหรับระบบทั่วไปที่ผลตอบสนองชั่วครู่ (Transient Response) ลดทอนหายไปจนเหลือแค่ผลตอบสนองแบบคงตัว (Steady State) การวิเคราะห์ด้วยตัวแปรเวลาเพียงตัวแปรเดียวสามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบได้เป็นอย่างดี แต่สำหรับระบบที่ผลตอบสนองชั่วครู่ไม่ลดทอนหายไปเช่นระบบที่มีการสั่นอย่างสม่ำเสมอในช่วงเวลาที่พิจารณาเช่น การสั่นของสปริง การแกว่งลูกตุ้ม หรือแม้แต่วงจรกำเนิดสัญญาณในทางวิศวกรรมไฟฟ้า เมื่อมีการป้อนอินพุตให้กับระบบ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ระบบด้วยตัวแปรทางเวลาเพียงตัวเดียวนั้นไม่สามารถอธิบายผลการทดลองจริงได้อย่างครอบคลุม ในปี 2005 ได้มีการพัฒนาแบบจำลองการอธิบายวงจรกำเนิดสัญญาณหรือว่าวงจรกำเนิดสัญญาณในสภาวะที่มีอินพุตบังคับด้วยเทคนิคตัวแปรเวลาหลายตัว[5-7] ที่ให้ผลการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณสำหรับอธิบายผลการทดลองได้ครอบคลุมมากกว่า และเมื่อไม่นานมานี้ในปี 2012 ได้มีการนำแบบจำลองดังกล่าวไปอธิบายการแกว่งของลูกตุ้มในกรณีที่มีอินพุตบังคับเข้ามาในระบบ ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เป็นอย่างดี[8] เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์แบบเดิมและการวิเคราะห์แบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา จึงขอนำเสนอการวิเคราะห์ระบบการกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีที่มีอินพุตเป็นสัญญาณที่มีขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยหลักการเดิมก่อน[5-7] แล้วจึงวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ระบบการกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีที่มีอินพุตเป็นสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยเทคนิคตัวแปรเวลาหลายตัว พร้อมทั้งนำเสนอผลการทดลองเกิดขึ้นจริงเพื่อยืนยันความครอบคลุมของเทคนิคตัวแปรเวลาหลายตัวในตอนท้าย

2.6.1 การวิเคราะห์ระบบการกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีที่มีอินพุตเป็นสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยหลักการเดิม

การอธิบายระบบการกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับที่สองในกรณีที่มีการป้อนอินพุตให้กับระบบนั้น สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของระบบได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผนภาพบล็อกแสดงแบบจำลองของระบบกำเนิดสัญญาณที่มีการป้อนอินพุตบังคับแบบเดิม

โดยที่ $x(t)$ คือสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบ และ $v(t)$ คือสัญญาณเอาต์พุตของระบบในกรณีที่มีอินพุตเข้ามาในระบบ และในการอธิบายระบบการกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ทั่วไปแล้วสามารถหาได้จากผลตอบสนองสมบูรณ์ $v_c(t)$ ของระบบที่ถูกอธิบายด้วยสมการอนุพันธ์ ซึ่งผลตอบสนองสมบูรณ์นั้นประกอบไปด้วยผลตอบสนองทางธรรมชาติ $v_n(t)$ รวมอยู่กับผลตอบสนองบังคับ $v_f(t)$ ดังสมการ (2.61)

$$v_c(t) = v_n(t) + v_f(t) \tag{2.61}$$

โดยสามารถหาผลตอบสนองทางธรรมชาติของระบบได้จากการแก้สมการอนุพันธ์อันดับสองซึ่งสามารถแสดงดังในสมการ (2.62)

$$a_2 \frac{d^2}{dt^2} v_n(t) + a_1 \frac{d}{dt} v_n(t) + a_0 v_n(t) = 0 \tag{2.62}$$

และสามารถหาผลตอบสนองบังคับของระบบได้ด้วยการแก้สมการอนุพันธ์อันดับสองดังในสมการ(2.63)

$$a_2 \frac{d^2}{dt^2} v_f(t) + a_1 \frac{d}{dt} v_f(t) + a_0 v_f(t) = f(t) \tag{2.63}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการหาคำตอบของผลตอบสนองทางธรรมชาตินั้นต้องอาศัยการแก้สมการ (2.62) โดยใช้เทคนิคการคาดเดาคำตอบ เมื่อให้ค่าคำตอบของผลตอบสนองทางธรรมชาติเป็นไปดังสมการ (2.64)

$$v_n(t) = Ke^{mt} \tag{2.64}$$

เมื่อทำการแทนค่าคำตอบของผลตอบสนองทางธรรมชาติในสมการ (2.64) ลงในสมการ (2.62) ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.65)

$$a_2 m^2 Ke^{mt} + a_1 mKe^{mt} + a_0 Ke^{mt} = 0 \tag{2.65}$$

ในกรณีที่ค่าสัมประสิทธ์ a_1 ของระบบมีค่าเป็นศูนย์จึงทำให้สามารถเขียนสมการ (2.65) ได้ใหม่ดังสมการ (2.66)

$$a_2 m^2 Ke^{mt} + a_0 Ke^{mt} = 0 \tag{2.66}$$

และเมื่อทำการแก้สมการ (2.66) แล้วจึงได้ค่าเป็นไปดังสมการ (2.67)

$$m = \pm j\sqrt{\frac{a_0}{a_2}} \tag{2.67}$$

ดังนั้นจึงได้ค่าคำตอบของผลตอบสนองทางธรรมชาติเป็นไปดังสมการ (2.68)

$$v_n(t) = K_1 e^{mt} + K_2 e^{mt} = K_1 e^{j\sqrt{\frac{a_0}{a_2}}t} + K_2 e^{-j\sqrt{\frac{a_0}{a_2}}t} \tag{2.68}$$

ในกรณีที่ K_1 และ K_2 มีค่าเท่ากัน สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.69)

$$K_1 = K_2 = H_x \tag{2.69}$$

โดยจากความสัมพันธ์ของออยเลอร์สามารถจัดรูปสมการ (2.68)ได้ใหม่และเมื่อให้ ω_n มีค่าเท่ากับ a_0/a_2 จึงได้ผลตอบสนองทางธรรมชาติมาดังสมการ (2.70)

$$v_n(t) = 2H_x\cos(\omega_n t) \tag{2.70}$$

จากสมการ (2.70) เมื่อทำการแทนค่าผลตอบสนองทางธรรมชาติในสมการ (2.61) จึงสามารถแสดงค่าผลตอบสนองสมบูรณ์ได้ใหม่ดังสมการ (2.71)

$$v_c(t) = 2H_x\cos(\omega_n t) + v_f(t) \tag{2.71}$$

ในสภาวะเริ่มต้นของระบบโดยที่ t มีค่าเท่ากับศูนย์และให้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบมีค่าเท่ากับ X_0 จึงทำให้เขียนสมการ (2.71) ได้ใหม่ดังสมการ (2.72)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_c(0) = 2H_x + v_f(0) = X_0 \qquad (2.72)$$

และสามารถจัดรูปสมการ (2.72) ได้ใหม่ดังสมการ (2.73)

$$2H_x = X_0 - v_f(0) \qquad (2.73)$$

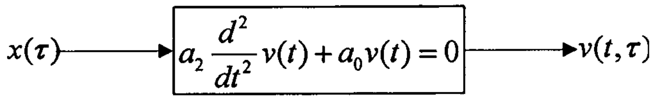
จากสมการ (2.71) เมื่อแทนค่า $2H_x$ จากสมการ (2.73) จึงสามารถแสดงสมการได้ใหม่ดังสมการ (2.74)

$$v_c(t) = \left(X_0 - v_f(0)\right)\cos\left(\omega_n t\right) + v_f(t) \qquad (2.74)$$

จากสมการ (2.74) จึงเห็นได้ว่าค่าขนาดของผลตอบสนองธรรมชาติของระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของผลตอบสนองบังคับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ณ สภาวะเริ่มต้น $v_f(0)$ เท่านั้น แต่จากงานวิจัยในเรื่องนี้หลายงานซึ่งพยายามชี้ให้เห็นว่าค่าขนาดของผลตอบสนองธรรมชาติของระบบนั้นเป็นฟังก์ชั่นของผลตอบสนองบังคับ ณ เวลาใดๆ ไม่ใช่แค่ ณ สภาวะเริ่มต้นของผลตอบสนองบังคับเท่านั้น หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าการป้อนอินพุตให้กับระบบที่ทำให้เกิดผลตอบสนองบังคับที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลานั้นมีผลต่อผลตอบสนองธรรมชาติในเวลาใดๆของระบบ

2.6.2 การวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณในกรณีที่มีการป้อนอินพุตบังคับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยเทคนิคตัวแปรทางเวลาหลายตัว

ในกรณีที่มีการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลานั้นเป็นการสื่อโดยนัยยะว่าเวลาของเอาต์พุตและอินพุตนั้นเป็นเวลาคนละเวลากัน ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองของระบบได้ใหม่ดังรูปที่ 2.16 โดยขนาดผลตอบสนองธรรมชาติของระบบเป็นฟังก์ชั่นของผลตอบสนองบังคับ ณ เวลาใดๆ ไม่ใช่แค่ ณ สภาวะเริ่มต้นของผลตอบสนองบังคับเท่านั้น หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเมื่อทำการป้อนอินพุตให้กับระบบทำให้ขนาดของผลตอบสนองธรรมชาติมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามผลตอบสนองบังคับที่เวลาใดๆ[5-7] โดยเวลาของอินพุตและเอาต์พุตมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นตัวแปรทางเวลาของอินพุตคือ $\tau = t + t_0$ เมื่อ τ คือเวลาของขนาดอินพุตที่ป้อนเข้ามา ณ เวลาใดๆ และ t คือเวลาของขนาดอินพุตหลังจากเวลาเริ่มต้นที่ป้อนเข้ามาในระบบและ t_0 คือเวลาของอินพุต ณ เวลาเริ่มต้นที่ป้อนเข้ามาในระบบ



รูปที่ 2.16 แผนภาพบล็อกแสดงแบบจำลองของระบบกำเนิดสัญญาณที่มีการป้อนอินพุตบังคับแบบหลายตัวแปรทางเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $x(\tau)$ คือสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบ และ $v(t)$ คือสัญญาณเอาต์พุตของระบบ ในกรณีที่มีการป้อนอินพุตเข้ามาในระบบ และสามารถหาความสัมพันธ์ของระบบกำเนิดสัญญาณได้ด้วยผลตอบสนองสมบูรณ์ $v_c(t,\tau)$ ของระบบที่ถูกอธิบายด้วยสมการอนุพันธ์ ซึ่งประกอบไปด้วยผลตอบสนองทางธรรมชาติ $v_n(t)$ รวมอยู่กับผลตอบสนองบังคับ $v_f(\tau)$ ดังสมการ (2.75)

$$v_c(t,\tau) = v_n(t) + v_f(\tau) \tag{2.75}$$

ในกรณีที่มีการป้อนอินพุตเข้ามาในระบบที่อธิบายด้วยสมการอนุพันธ์อันดับสอง จึงสามารถเขียนสมการได้ดังสมการ (2.76)

$$a_2 \frac{d^2}{dt^2} v_c(t,\tau) + a_1 \frac{d}{dt} v_c(t,\tau) + a_0 v_c(t,\tau) = x(\tau) \tag{2.76}$$

โดยสามารถหาผลตอบสนองทางธรรมชาติของระบบได้จากการแก้สมการอนุพันธ์อันดับสองดังในสมการ (2.77)

$$a_2 \frac{d^2}{dt^2} v_n(t) + a_1 \frac{d}{dt} v_n(t) + a_0 v_n(t) = 0 \tag{2.77}$$

และสามารถหาผลตอบสนองบังคับของระบบได้ด้วยการแก้สมการอนุพันธ์อันดับสองดังในสมการ (2.78)

$$a_2 \frac{d^2}{d\tau^2} v_f(\tau) + a_1 \frac{d}{d\tau} v_f(\tau) + a_0 v_f(\tau) = x(\tau) \tag{2.78}$$

สำหรับการหาคำตอบของผลตอบสนองทางธรรมชาตินั้นต้องอาศัยการแก้สมการ (2.77) เมื่อใช้เทคนิคการคาดเดาคำตอบ เมื่อให้ผลตอบสนองทางธรรมชาติเป็นไปดังสมการ (2.79)

$$v_n(t) = Ke^{mt} \tag{2.79}$$

เมื่อทำการแทนค่าคำตอบให้ผลตอบสนองทางธรรมชาติในสมการ (2.90) ลงในสมการ (2.88) ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.80)

$$a_2 m^2 Ke^{mt} + a_1 m Ke^{mt} + a_0 Ke^{mt} = 0 \tag{2.80}$$

ในกรณีที่ค่าสัมประสิทธ์ a_1 ของระบบมีค่าเป็นศูนย์จึงทำให้สามารถเขียนสมการ (2.91) ได้ใหม่ดังสมการ (2.81)

$$a_2 m^2 Ke^{mt} + a_0 Ke^{mt} = 0 \tag{2.81}$$

และเมื่อทำการแก้สมการ (2.81) จึงได้ค่าเป็นไปดังสมการ (2.82)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_{1,2} = \pm j\sqrt{\frac{a_0}{a_2}} \tag{2.82}$$

ดังนั้นจึงได้ค่าคำตอบของผลตอบสนองทางธรรมชาติเป็นไปดังสมการ (2.83)

$$v_n(t) = K_1 e^{m_1 t} + K_2 e^{m_2 t} = K_1 e^{j\sqrt{\frac{a_0}{a_2}}t} + K_2 e^{-j\sqrt{\frac{a_0}{a_2}}t} \tag{2.83}$$

ในกรณีที่ K_1 และ K_2 มีค่าเท่ากัน จะสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.84)

$$K_1 = K_2 = H_x \tag{2.84}$$

โดยจากความสัมพันธ์ของออยเลอร์จึงสามารถจัดรูปสมการ (2.83) ได้ใหม่และเมื่อให้ ω_n มีค่าเท่ากับ a_0/a_2 จึงได้ผลตอบสนองทางธรรมชาติมาดังสมการ (2.85)

$$v_n(t) = 2H_x \cos(\omega_n t) \tag{2.85}$$

สำหรับการหาคำตอบของผลตอบสนองบังคับนั้นต้องอาศัยการแก้สมการ (2.78) เมื่อกำหนดให้อินพุตที่ป้อนให้กับระบบเป็นไปดังสมการ (2.86) โดยที่ X_0 และ ω_f คือ ค่าขนาดและเฟสของอินพุต

$$x(\tau) = X_0 \cos(\omega_f \tau) \tag{2.86}$$

สามารถหาค่าผลตอบสนองบังคับได้ดังสมการ (2.87) โดยที่ $|H(j\omega_f)|$ คือ ค่าขนาดของระบบที่ความถี่ ω_f และ $\angle H(j\omega_f)$ คือ ค่าเฟสที่เลื่อนไปของระบบที่ความถี่ ω_f

$$v_f(\tau) = X_0 |H(j\omega_f)| \cos(\omega_f \tau + \angle H(j\omega_f)) \tag{2.87}$$

จากสมการ (2.75) เมื่อแทนค่าผลตอบสนองทางธรรมชาติในสมการ (2.96) สามารถแสดงค่าผลตอบสนองสมบูรณ์ได้ใหม่ดังสมการ (2.88)

$$v_c(t,\tau) = 2H_x \cos(\omega_n t) + v_f(\tau) \tag{2.88}$$

โดยเมื่อแทนค่าสภาวะเริ่มต้น $v(t_0,\tau) = X_0$ ดังสมการ (2.89)

$$v_c(t_0,\tau) = 2H_x + v_f(\tau) = X_0 \tag{2.89}$$

และสามารถหาค่า $2H_x$ ได้ดังสมการ (2.90)

$$2H_x = \frac{X_0 - v_f(\tau)}{\cos \omega_n t_0} \tag{2.90}$$

และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงให้ค่า $t_0 = 0$ ซึ่งสามารถจัดรูปสมการ (2.90) ได้ใหม่ดังสมการ (2.91)

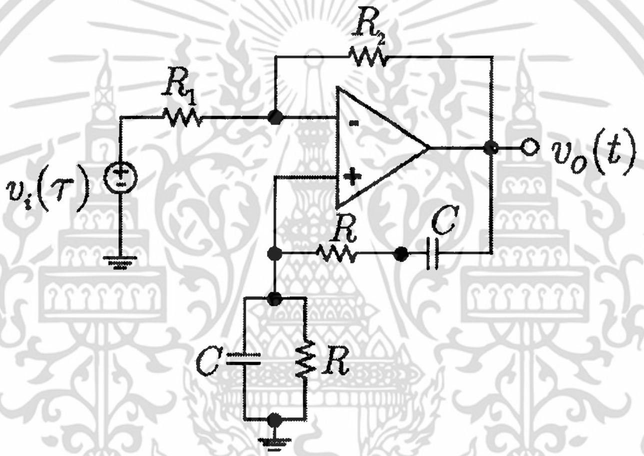
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2H_x = X_0 - v_f(\tau) \tag{2.91}$$

จากสมการ (2.88) เมื่อแทนค่า $2H_x$ ในสมการจึงสามารถเขียนสมการผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบได้ใหม่ดังสมการ (2.92)

$$v_c(t,\tau) = \left(X_0 - v_f(\tau)\right)\cos\left(\omega_n t\right) + v_f(\tau) \tag{2.92}$$

เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์แบบเดิมและการวิเคราะห์แบบอาศัยเทคนิคหลายตัวแปรเวลาอย่างชัดเจนจึงขอยกตัวอย่างงานวิจัยเรื่อง "New analytic solution of second-order oscillator using multi-time variables technique"[5] ที่ได้ยกตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ ดังในรูปที่ 2.17 มาทำการวิเคราะห์



รูปที่ 2.17 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรง, สัญญาณไซน์และสัญญาณฟันเลื่อย[5]

จากรูปที่ 2.17 เอาต์พุต $v_o(t)$ สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.93)

$$v_o''(t) + \frac{1}{R^2C^2}v_o(t) = -2\left(v_i''(\tau) + \frac{3}{RC}v_i'(\tau) + \frac{v_i(\tau)}{R^2C^2}\right) \tag{2.93}$$

จากสมการ (2.93) ความถี่ที่ผลิตออกมาจากวงจรสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.94)

$$\omega = 1/RC \tag{2.94}$$

เพื่อทดสอบผลกระทบต่างๆของฟังก์ชั่นบังคับต่อขนาดของผลตอบสนองธรรมชาติ จึงได้ป้อนอินพุตให้กับระบบที่สัญญาณต่างกันดังนี้ $v_{i1}(\tau) = V_{DC}$, $v_{i2}(\tau) = V_p\cos(\omega_m\tau)$ และ $v_{i3}(\tau) = (2f_{ramp}V_p)\tau$ เมื่อแทนค่าอินพุตแต่ละค่าลงในสมการ (2.93) จึงได้ผลฟังก์ชั่นบังคับดังสมการ (2.95) – (2.108) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_1(\tau) = -2V_{DC}/R^2C^2 = K \tag{2.95}$$

$$f_2(\tau) = -2\left[\begin{matrix}\left(\dfrac{V_p}{R^2C^2}\sqrt{\left(1-\omega_m^2R^2C^2\right)^2+\left(3\omega_m RC\right)^2}\right)\\ \times\cos\left(\omega_m\tau-\tan^{-1}\left(-3\omega_m RC/\left(1-\omega_m^2R^2C^2\right)\right)\right)\end{matrix}\right] \tag{2.96}$$

$$f_3(\tau) = -2\left(\frac{6}{RC}f_{ramp}V_p + \frac{2}{R^2C^2}f_{ramp}V_p\right) \tag{2.97}$$

จากเงื่อนไขเริ่มต้นที่ $t = t_0 = 0$ ทำให้ $v_o(0) = X_0 = \pm V_{SAT}$ โดย V_{SAT} เป็นแรงดัน saturate ของออปแอมป์ โดยผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบที่ถูกป้อนอินพุต $v_{i1}(\tau)$, $v_{i2}(\tau)$ และ $v_{i3}(\tau)$ ตามลำดับ สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.98) - (2.100)

$$\begin{aligned} v_{o1}(t,\tau) &= (\pm V_{SAT} + 2V_{DC})\cos(t/RC) - 2V_{DC} \\ &= \begin{cases}(2V_{DC}+V_{SAT})\cos(t/RC)-2V_{DC}, V_{DC}<0\\ (2V_{DC}-V_{SAT})\cos(t/RC)-2V_{DC}, V_{DC}>0\end{cases}\end{aligned} \tag{2.98}$$

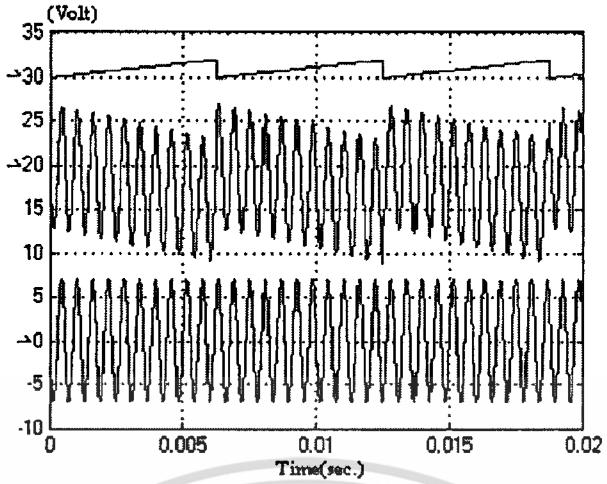
$$v_{o2}(t,\tau) = \left\{\pm\left[V_{SAT} - B\cos(\omega_m\tau-\phi)\right]\cos(t/RC)\right\} + B\cos(\omega_m\tau-\phi) \tag{2.99}$$

โดย $B = \frac{-2V_p}{1-\omega_m^2R^2C^2}\sqrt{\left(1-\omega_m^2R^2C^2\right)^2+\left(3\omega_m RC\right)^2}$ และ $\phi = \tan^{-1}\left(-3\omega_m RC/\left(1-\omega_m^2R^2C^2\right)\right)$

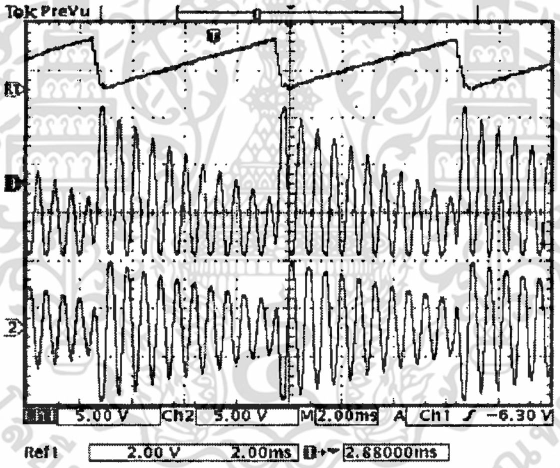
$$v_{o3}(t,\tau) = \left[\begin{matrix}\left\{\left(\pm V_{SAT} + 2\left(\left(2f_{ramp}V_p\right)\tau + 6f_{ramp}RCV_p\right)\right)\cos(t/RC)\right\}\\ -2\left(\left(2f_{ramp}V_p\right)\tau + 6f_{ramp}RCV_p\right)\end{matrix}\right] \tag{2.100}$$

เมื่อทำการพิจาณาสมการ (2.98) - (2.100) สามารถเห็นได้ว่าผลตอบสนองบังคับอยู่ในพจน์ของขนาดของผลตอบสนองธรรมชาติ และสามารถแสดงผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ได้โดยทำการสาธิตทดลองป้อนสัญญาณอินพุตรูปฟันเลื่อยขนาด 2 โวลท์ ความถี่ 144 Hz ความถี่ของผลตอบสนองธรรมชาติใช้ความถี่ 1.7 kHz โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LM741 ป้อนไฟเลี้ยง ± 9 โวลท์ จากรูปที่ 2.18 ผลเชิงตัวเลขที่มีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์แบบเดิม โดยที่สัญญาณด้านบนในรูปคือสัญญาณอินพุตรูปฟันเลื่อย สัญญาณตรงกลางในรูปคือผลตอบสนองสมบูรณ์ สัญญาณด้านล่างในรูปคือผลตอบสนองธรรมชาติเพียงอย่างเดียว สำหรับรูปที่ 2.19 (a), (b) และ (c) เป็นผลการทดลองที่ได้จากการทดลองจริง การจำลองในโปรแกรม PSPICE และผลเชิงตัวเลขของการวิเคราะห์ที่นำเสนอใหม่ ซึ่งสัญญาณด้านบนในรูปคือสัญญาณอินพุต สัญญาณตรงกลางในรูปคือผลตอบสนองสมบูรณ์ สัญญาณด้านล่างในรูปคือผลตอบสนองธรรมชาติเพียงอย่างเดียว สามารถเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE และผลการทดลองจริงสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขซึ่งมีพื้นฐานมาจากหลักการการวิเคราะห์ที่นำเสนอ

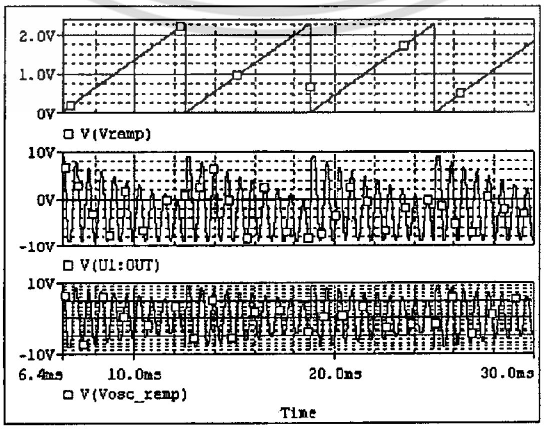
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงผลเชิงตัวเลขที่มีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์แบบเดิม : อินพุตบังคับ (สัญญาณด้านบน), ผลตอบสนองสมบูรณ์ (สัญญาณตรงกลาง), ผลตอบสนองธรรมชาติ (สัญญาณด้านล่าง)[5]

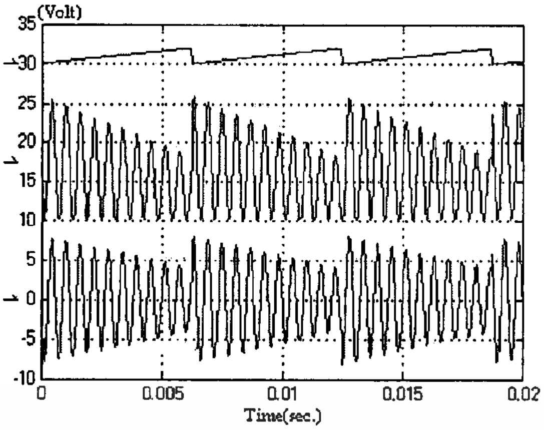


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



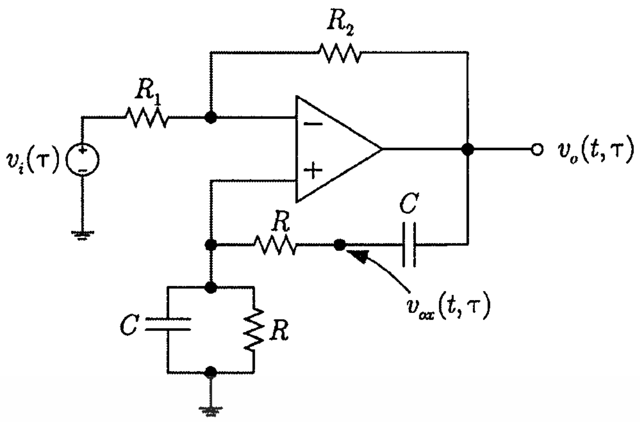
(c)

รูปที่ 2.19 แสดงขนาดที่ถูกควบคุมโดยผลตอบสนองบังคับที่ได้ (a) จากการทดลองจริง, (b) ผลจากการจำลองในโปรแกรม PSPICE และ (c) ผลเชิงตัวเลขโดยยึดหลักการวิเคราะห์แบบใหม่ [5]

จากรูปที่ 2.19 สัญญาณด้านบน, สัญญาณตรงกลางและสัญญาณด้านล่างคือสัญญาณฟันเลื่อยบังคับ, ผลตอบสนองสมบูรณและผลตอบสนองธรรมชาติ ตามลำดับ

เมื่อทำการพิจารณาผลเชิงตัวเลขที่มีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์แบบเดิม จากรูปที่ 2.18 เทียบกับผลการทดลองจริงและผลการจำลองที่แสดงในรูปที่ 2.19(a) และ 2.19 (b) ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในส่วนของผลเชิงตัวเลขโดยยึดหลักการวิเคราะห์แบบใหม่หรือแบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาดังรูปที่ 2.19 (c) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงและผลการจำลองที่แสดงในรูปที่ 2.19 (a) และ 2.19(b) พบว่ามีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน สำหรับกรณีของฟังก์ชั่นบังคับที่บังคับด้วยไฟฟ้ากระแสตรงสามารถอธิบายได้ในงานวิจัยเรื่อง "Wide-band amplitude control of the second-order oscillator circuit" [6] โดยอาจารย์ธงชัย มณีชูเกตและคณะ ซึ่งได้ทำการป้อนอินพุตให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์เพื่อยืนยันหลักการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณในกรณีที่มีการป้อนอินพุตบังคับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยเทคนิคตัวแปรทางเวลาหลายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกป้อนอินพุตเป็นสัญญาณไฟตรง[6]

จากสมการผลตอบสนองสมบูรณ์ที่ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคตัวแปรเวลาหลายตัวได้ดังสมการ (2.101)

$$v_c(t,\tau)=\left(X_0-v_f(\tau)\right)\cos\left(\omega_n t\right)+v_f(\tau) \qquad (2.101)$$

จากรูปที่ 2.20 สามารถแสดงสมการเอาต์พุตของระบบได้ดังสมการ (2.102)

$$v_o''(t)+\frac{1}{RC}\left(3-\frac{1}{k_1}\right)v_o'(t)+\frac{v_o(t)}{R^2C^2}=-\frac{k_2}{k_1}\left(v_i''(\tau)+\frac{3v_i'(\tau)}{RC}+\frac{v_i(\tau)}{R^2C^2}\right) \qquad (2.102)$$

โดยที่ $k_1 = R_1/(R_1+R_2)$, $k_2 = R_2/(R_1+R_2)$ และ $v_i(\tau)$ คือ อินพุตที่ป้อนให้กับระบบ เพื่อให้วงจรกำเนิดสัญญาณเกิดการออสซิลเลต ทำให้ค่าในเทอม $(3-1/k_1)/RC$ เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงได้ค่าเงื่อนไขในการออสซิลเลต คือ $R_2/R_1 = 2$ ซึ่งสามารถเขียนสมการเอาต์พุตได้ใหม่ดังสมการ (2.103)

$$v_o''(t)+\frac{v_o(t)}{R^2C^2}=-2\left(v_i''(\tau)+\frac{3v_i'(\tau)}{RC}+\frac{v_i(\tau)}{R^2C^2}\right) \qquad (2.103)$$

เมื่อทำการป้อนอินพุตที่เป็นกระแสไฟตรงให้กับระบบ $v_i(\tau)=V_{DC}$ เมื่อแทนค่าอินพุตลงในสมการ (2.103) จึงได้ผลฟังก์ชั่นบังคับได้ดังสมการ (2.104)

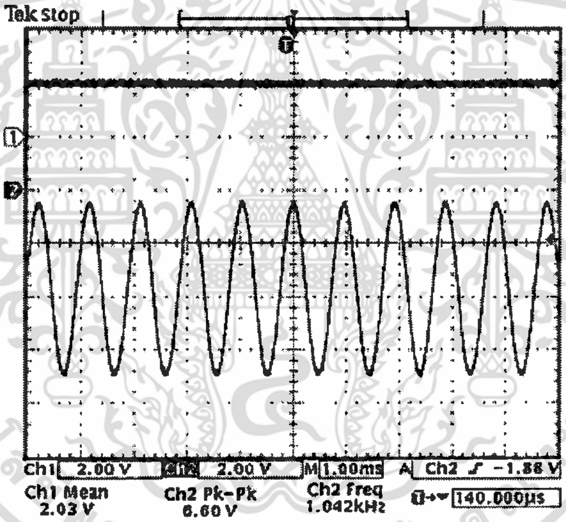
$$f(\tau)=-2V_{DC}/R^2C^2=K \qquad (2.104)$$

ที่ $t=t_0=0$ เงื่อนไขเริ่มต้น $v_o(0)=X_0=\pm V_{SAT}$ โดย V_{SAT} เป็นแรงดัน saturate ของออปแอมป์ ซึ่งเมื่อทำการแทนค่าค่าเงื่อนไขเริ่มต้นและผลตอบสนองบังคับลงในสมการ (2.101) จึงสามารถแสดงผลตอบสนองสมบูรณ์ได้ใหม่ดังสมการ (2.105)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

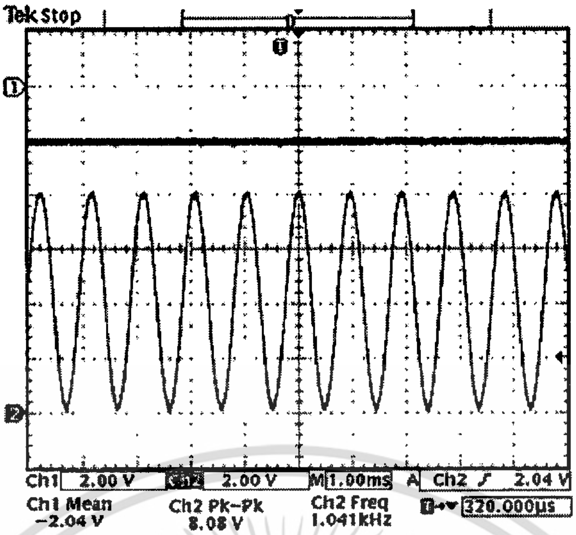
$$v_o(t,\tau) = (\pm V_{SAT} + 2V_{DC})\cos(t/RC) - 2V_{DC}$$
$$= \begin{cases} (2V_{DC} + V_{SAT})\cos(t/RC) - 2V_{DC}, V_{DC} < 0 \\ (2V_{DC} - V_{SAT})\cos(t/RC) - 2V_{DC}, V_{DC} > 0 \end{cases} \quad (2.105)$$

เมื่อทำการพิจารนาสมการ (2.116) ผลตอบสนองบังคับอยู่ในพจน์ของขนาดของผลตอบสนองธรรมชาติ สามารถแสดงผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ ได้โดยทำการทดลองป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณไฟตรง ± 2 โวลท์ ให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณมีความถี่มูลฐานที่ 1kHz โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LM351 ป้อนไฟเลี้ยง ± 9 โวลท์ จากผลการทดลองดังรูปที่ 2.24 เป็นผลการทดลองที่ได้ทำการป้อนอินพุตสัญญาณไฟตรง 2 โวลท์ให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณ และจากรูปที่ 2.25 เป็นผลการทดลองที่ได้ทำการป้อนอินพุตสัญญาณไฟตรง -2 โวลท์ให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยสัญญาณด้านบนในรูปคือสัญญาณอินพุต และสัญญาณด้านล่างในรูปคือผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบ



รูปที่ 2.21 เอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกป้อนอินพุตเป็นไฟกระแสตรงบวก 2 โวลท์[6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 เอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกป้อน อินพุตเป็นไฟกระแสตรงลบ 2 โวลท์[6]

ดังนั้นสำหรับฟังก์ชั่นบังคับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา สามารถยืนยันได้ว่าการวิเคราะห์แบบใหม่ที่นำเสนอนั้นสามารถให้ผลตอบสนองที่ถูกต้องสำหรับระบบสมการอนุพันธ์อันดับสองมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์แบบเดิม ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าขนาดของผลตอบสนองธรรมชาติสามารถถูกบังคับด้วยฟังก์ชั่นบังคับที่ป้อนเป็นอินพุตให้กับระบบหรือผลตอบสนองบังคับนั่นเองและเนื่องด้วยการวิเคราะห์ข้างต้นนั้นเป็นการอธิบายระบบการสั่นด้วยสมการอนุพันธ์อันดับที่สองในเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นการสื่อความหมายโดยนัยยะว่าเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรกำเนิดสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วจะเกิดปรากฏการณ์เป็นไปตามการวิเคราะห์ข้างต้นสำหรับทุกๆวงจรกำเนิดสัญญาณทางไฟฟ้าที่อธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับสองขึ้นไปไม่ว่าจะเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำหรือย่านความถี่สูงก็ตาม ซึ่งในหัวข้อถัดไปเป็นการประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์แบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาเพื่อย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงโดยใช้วงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียวและยกตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ต่ำซึ่งตัวอย่างที่นำมาประกอบไปด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์, เลื่อนเฟส, ทวินที, ควอดราเจอร์และในวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่สูงแบบโคลพิตต์ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การย้ายย่านความถี่ด้วยหลักการวิเคราะห์ของวงจรกำเนิดสัญญาณภายใต้สภาวะอินพุตบังคับโดยอาศัยเทคนิคการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา

3.1 กล่าวนำ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำหลักการวิเคราะห์ของวงจรกำเนิดสัญญาณภายใต้สภาวะอินพุตบังคับโดยอาศัยเทคนิคการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลามาประยุกต์ใช้กับวงจรกำเนิดสัญญาณภายใต้สภาวะอินพุตบังคับทั้งในความถี่ต่ำและความถี่สูงเพื่อย้ายย่านความถี่ โดยทั่วไปแล้วการหาค่าคำตอบผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบเชิงเส้นนั้นประกอบไปด้วยผลตอบสนองธรรมชาติและผลตอบสนองบังคับ ดังนั้นจึงได้ยกตัวอย่างการหาค่าผลตอบสนองสมบูรณ์ในวงจรกำเนิดสัญญาณใดๆ ทั้งในวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ต่ำและวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่สูง เพื่อความง่ายต่อการอธิบาย จึงได้แสดงการวิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ต่ำและความถี่สูงเสียก่อน แล้วจึงแสดงการวิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ต่ำและความถี่สูงในลำดับถัดมา และแสดงผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ต่ำและความถี่สูงในลำดับสุดท้าย ซึ่งจากทฤษฎีการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาที่ได้นำเสนอนั้นค่าของผลตอบสนองบังคับมีผลต่อขนาดของผลตอบสนองธรรมชาติด้วยปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณใดๆทั้งในวงจรกำเนิดสัญญาณแบบความถี่ต่ำและความถี่สูง

3.2 หลักการในการย้ายย่านความถี่ที่ได้จากวิเคราะห์ระบบการกำเนิดสัญญาณที่มีการป้อนอินพุตบังคับด้วยเทคนิคการแยกตัวแปรเวลาหลายตัวที่นำเสนอ

จากหลักการวิเคราะห์ระบบการกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีที่มีอินพุตเป็นสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยหลักการการแยกตัวแปรทางเวลาที่ได้แสดงในหัวข้อที่ 2.6.2 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงได้จากสมการ (2.103) ซึ่งสามารถแสดงได้ใหม่ดังสมการ (3.1)

$$v_o(t,\tau)=\left(X_0-v_f(\tau)\right)\cos\left(\omega_n t\right)+v_f(\tau) \tag{3.1}$$

จากสมการ (3.1) สังเกตได้ว่าผลตอบสนองบังคับมีผลต่อขนาดของผลตอบสนองทางธรรมชาติ ดังนั้นในกรณีที่มีการป้อนอินพุตเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ให้กับระบบกำเนิดสัญญาณและ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้ง่ายต่อการแสดงการวิเคราะห์จึงประมาณค่าให้อินพุตมีค่าเท่ากับอินพุตบังคับ $v_i(\tau) = A_c \cos(\omega_c \tau)$ โดยที่ A_c และ ω_c คือค่าขนาดและเฟสของอินพุต ดังนั้นจึงสามารถแสดงผลตอบสนองบังคับได้ดังสมการ (3.2) โดยที่ $|H(j\omega_c)|$ คือค่าขนาดของระบบที่ความถี่ ω_c และ $\angle H(j\omega_c)$ คือค่าเฟสที่เลื่อนไปของระบบที่ความถี่ ω_c

$$v_f(\tau) = A_c |H(\omega_c)| \cos(\omega_c \tau + \angle H(\omega_c)) \tag{3.2}$$

เมื่อนำผลตอบสนองบังคับในสมการ (3.2) มาแทนลงในสมการ (3.1) และให้เวลาเริ่มต้นมีค่าน้อยมาก $t_0 \approx 0$ โดยที่ $\tau = t + t_0$ จึงทำให้สามารถแสดงสมการผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบได้ดังสมการ (3.3)

$$\begin{aligned} v_o(t) = & -\frac{A_c |H(\omega_c)| \cos\left((\omega_n - \omega_c)t + \angle H(\omega_c)\right)}{2} + X_0 \cos(\omega_n t) \\ & -\frac{A_c |H(\omega_c)| \cos\left((\omega_n + \omega_c)t + \angle H(\omega_c)\right)}{2} + A_c |H(\omega_c)| \cos(\omega_c \tau + \angle H(\omega_c)) \end{aligned} \tag{3.3}$$

สังเกตได้ว่าพจน์แรกและพจน์ที่สามทางด้านขวาของสมการ (3.3) เป็นพจน์ที่มีความถี่เป็นผลต่างและผลรวมระหว่างความถี่ธรรมชาติและความถี่อินพุตหรือเป็นพจน์ที่ใช้ในการย้ายย่านความถี่ลงและย้ายย่านความถี่ขึ้นมานั่นเอง ซึ่งเห็นได้ว่าหลักการการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณภายใต้สภาวะอินพุตบังคับโดยอาศัยเทคนิคการแยกตัวแปรทางเวลาที่นำมาประยุกต์ใช้ สามารถอธิบายองค์ประกอบทางความถี่ที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด เพื่อเป็นการยืนยันถึงหลักการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการวิเคราะห์และทดลองสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณทั้งในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงหลายวงจรด้วยกัน ดังในหัวข้อ 3.3 และในบทที่ 4 ตามลำดับ

3.3 การวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณที่นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่

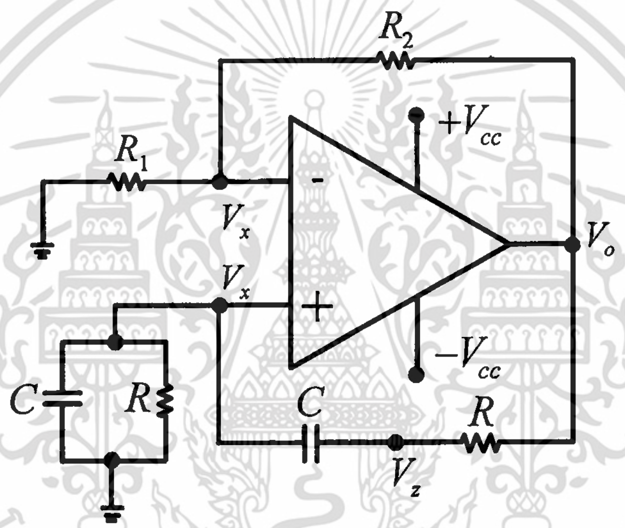
ในหัวข้อนี้ได้นำหลักการการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีป้อนอินพุตเป็นสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อย้ายย่านความถี่มาประยุกต์ใช้กับวงจรกำเนิดสัญญาณทั้งในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูง โดยวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำได้ยกตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ เลื่อนเฟส ทวินทีและควอดราเจอร์ สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่สูงได้ยกตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ หัวข้อนี้ได้แสดงการวิเคราะห์ถึงผลตอบสนองธรรมชาติ ผลตอบสนองบังคับและผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ภายใต้สภาวะอินพุตบังคับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 วิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติ

โดยทั่วไปแล้วผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบเชิงเส้นใดๆประกอบไปด้วยผลตอบสนองธรรมชาติและผลตอบสนองบังคับที่เป็นอิสระต่อกันรวมกันอยู่ สำหรับการหาผลตอบสนองธรรมชาติของระบบเพียงอย่างเดียวนั้น ต้องพิจารณาในกรณีที่ไม่มีการป้อนอินพุตให้กับระบบ สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณที่ได้นำมายกตัวอย่างในการวิเคราะห์เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ ประกอบไปด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ เลื่อนเฟส ทวินทีและควอดราเจอร์ ส่วนวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่สูงได้ยกตัวอย่างด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์

3.3.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์



รูปที่ 3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติ

เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรจากรูปที่ 3.1 ด้วยการวิเคราะห์โหนดที่จุดรวม V_x และ V_z ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ใน S - domain จึงได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการ (3.4) , (3.5) และ (3.6) ตามลำดับโดยที่ V_x คือแรงดันที่ขาลบและขาบวกของออป-แอมป์และ V_o คือแรงดันที่ขาเอาต์พุต

$$\left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\right)V_x(s)-\frac{V_o(s)}{R_2}=0 \tag{3.4}$$

$$\frac{2V_x(s)-V_z(s)}{R}+sC\,V_x(s)=0 \tag{3.5}$$

$$\frac{V_z(s)-V_x(s)}{R}+sC\big(V_z(s)-V_o(s)\big)=0 \tag{3.6}$$

จากสมการ (3.4) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_x ได้ดังสมการ (3.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_x(s)=\left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)V_o(s) \tag{3.7}$$

จากสมการ (3.5) จึงสามารถหาสมการแรงดันรวม v_z ได้ดังสมการ (3.8)

$$V_z(s)=\left(\frac{2R_1+sR_1RC}{R_1+R_2}\right)V_o(s) \tag{3.8}$$

จากสมการ (3.6) เมื่อทำการแทนค่า V_x และ V_z แล้วจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_o ได้ดังสมการ (3.9)

$$s^2R_1R^2C^2V_o(s)+s\left(2R_1RC-R_2RC\right)V_o(s)+R_1V_o(s)=0 \tag{3.9}$$

เมื่อทำการแปลงลาปลาซผกผันจากสมการ (3.9) เพื่อทำการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาจึงสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.10)

$$R_1R^2C^2v_o''(t)+\left(2R_1RC-R_2RC\right)v_o'(t)+R_1v_o(t)=0 \tag{3.10}$$

จากสมการ (3.10) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธ์กับสมการอนุพันธ์อันดับสองจากสมการ (2.88) พบว่าค่าสัมประสิทธ์

$a_2=R_1R^2C^2$

$a_1=\left(2R_1RC-R_2RC\right)$

$a_0=R_1$

เพื่อทำให้วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์สามารถออสซิลเลตเป็นสัญญาณไซนูซอยดอลได้นั้นค่าสัมประสิทธ์ a_1 ของระบบต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ดังสมการ (3.11)

$$a_1=2R_1RC-R_2RC=0 \tag{3.11}$$

จากสมการ (3.11) สามารถหาค่าเงื่อนไขในการออสซิลเลตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ได้คือ $R_2=2R_1$ และเมื่อทำการแทนค่าเงื่อนไขลงในสมการ (3.10) จึงสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการ (3.12)

$$R_1R^2C^2v_o''(t)+R_1v_o(t)=0 \tag{3.12}$$

จากสมการ (3.12) เมื่อนำ $R_1R^2C^2$ หารตลอดทั้งสมการและแทนค่าผลเฉลยคำตอบ $v_o(t)=Ae^{mt}$ จึงสามารถเขียนสมการคุณลักษณะเฉพาะได้ดังสมการ (3.13)

$$m^2+\frac{1}{R^2C^2}=0 \tag{3.13}$$

เมื่อทำการแก้สมการ (3.13) และทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถหาค่าคำตอบได้ดังสมการ (3.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_{1,2} = \pm\sqrt{\frac{1}{R^2C^2}}j \tag{3.14}$$

และสามารถแสดงคำตอบของสมการอนุพันธ์ที่เป็นผลตอบสนองธรรมชาติ $v_o(t)$ ดังสมการ (3.15)

$$v_o(t) = A_1e^{m_1t} + A_2e^{m_2t} = A_1e^{j\frac{t}{RC}} + A_2e^{-j\frac{t}{RC}} \tag{3.15}$$

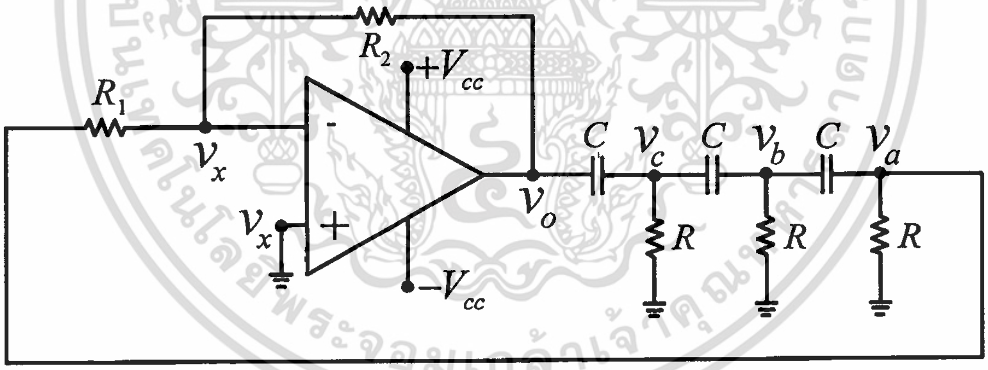
โดยที่ A_1 และ A_2 เป็นค่าคงที่ จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สำหรับในกรณีที่ $v_o(t)$ เป็นจำนวนจริง จึงให้ $A_1 = A_2 = A_x$ ทำให้สามารถเขียนสมการ (3.16) ได้ใหม่ดังนี้

$$v_o(t) = A_xe^{j\frac{t}{RC}} + A_xe^{-j\frac{t}{RC}} = 2A_x\cos\left(\frac{t}{RC}\right) \tag{3.16}$$

จากสมการ (3.16) สามารถแสดงค่าความถี่ที่ถูกผลิตออกมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากอินพุตบังคับได้ดังสมการ (3.17)

$$f_{LO} = \frac{1}{2\pi RC} \tag{3.17}$$

3.3.1.2 **วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส**



รูปที่ 3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติ

เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรจากรูปที่ 3.2 ด้วยการวิเคราะห์โหนดของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส เมื่อทำการวิเคราะห์สมการโหนดที่จุดรวม V_x , V_a , V_b และ V_c ใน S - domain จึงได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการ (3.18)-(3.19) ตามลำดับ โดยที่ V_x คือแรงดันที่ขาลบและขาบวกของออป-แอมป์ , V_o คือแรงดันที่ขาเอาต์พุต

$$\frac{V_x(s)-V_a(s)}{R_1} + \frac{V_x(s)-V_o(s)}{R_2} = 0 \tag{3.18}$$

$$\frac{V_a(s)-V_x(s)}{R_1} + \frac{V_a(s)}{R} + sC(V_a(s)-V_b(s)) = 0 \tag{3.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_b(s)}{R}+sC\left(V_b(s)-V_a(s)\right)+sC\left(V_b(s)-V_c(s)\right)=0 \tag{3.20}$$

$$\frac{V_c(s)}{R}+sC\left(V_c(s)-V_b(s)\right)+sC\left(V_c(s)-V_o(s)\right)=0 \tag{3.21}$$

จากการสังเกตวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส จึงได้ว่าแรงดันที่จุดรวม V_x เป็นกราวด์เสมือนทำให้แรงดันรวมที่จุด V_x มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อทำการจัดรูปสมการ (3.18) ใหม่ ทำให้สามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_a ได้ดังสมการ (3.22)

$$V_a(s)=-\left(\frac{R_1}{R_2}\right)V_o(s) \tag{3.22}$$

จากสมการ (3.19) เมื่อทำการประมาณให้ค่า $\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R}\right)\approx\frac{1}{R}$ และทำการแทนค่าสมการแรงดันรวมที่จุด V_a ลงในสมการ (3.19) จึงสามารถจัดรูปสมการได้ใหม่ ดังสมการแรงดันรวมที่จุด V_b ได้ดังสมการ (3.23)

$$V_b(s)=-\left(\left(\frac{R_1}{sR_2RC}\right)+\left(\frac{R_1}{R_2}\right)\right)V_o(s) \tag{3.23}$$

จากสมการ (3.20) เมื่อทำการแทนค่าสมการแรงดันรวมที่จุด V_a และ V_b เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ สามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_c ได้ดังสมการ (3.24)

$$V_c(s)=-\left(\left(\frac{R_1}{s^2R_2R^2C^2}\right)+3\left(\frac{R_1}{sR_2RC}\right)+\left(\frac{R_1}{R_2}\right)\right)V_o(s) \tag{3.24}$$

จากสมการ (3.21) เมื่อทำการแทนค่าสมการแรงดันรวมที่จุด V_b และ V_c เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.25)

$$s^3V_o(s)+\frac{6s^2}{\left(\frac{R_1+R_2}{R_1}\right)RC}V_o(s)+\frac{5s}{\left(\frac{R_1+R_2}{R_1}\right)R^2C^2}V_o(s)+\frac{1}{\left(\frac{R_1+R_2}{R_1}\right)R^3C^3}V_o(s)=0 \tag{3.25}$$

จากสมการอนุพันธ์อันดับสามเมื่อทำการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาจึงสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.26)

$$a_3v_o'''(t)+a_2v_o''(t)+a_1v_o'(t)+a_0v_o(t)=0 \tag{3.26}$$

จากสมการ (3.26) เมื่อทำการแก้สมการจึงสามารถเขียนสมการคุณลักษณะเฉพาะได้ดังสมการ (3.27)

$$a_3m^3+a_2m^2+a_1m+a_0=0 \tag{3.27}$$

เมื่อนำ a_3 หารตลอดทั้งสมการ (3.27) สามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการ (3.28)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m^3+\frac{a_2}{a_3}m^2+\frac{a_1}{a_3}m+\frac{a_0}{a_3}=0 \tag{3.28}$$

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการพหุนามกำลังสามและกำหนดให้มีคู่สังยุคคู่หนึ่ง ซึ่ง สามารถเขียนได้ดังสมการ (3.29)

$$(m+jk)(m-jk)(m+b)=0 \tag{3.29}$$

เมื่อทำการคูณกระจายในสมการ (3.29) และทำการจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการ (3.30)

$$m^3+bm^2+k^2m+k^2b=0 \tag{3.30}$$

ทำการเปรียบเทียบสมการ (3.28) กับสมการ (3.30) พจน์ต่อพจน์จึงสามารถเทียบค่าได้ว่า $b=\frac{a_2}{a_3}$, $k^2=\frac{a_1}{a_3}$ และ $k^2b=\frac{a_0}{a_3}$ ซึ่งเงื่อนไขที่ทำให้การแทนค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้เป็นจริงได้ต้องให้ค่าเป็นดังสมการ (3.31)

$$\frac{a_0}{a_3}=\frac{a_1}{a_3}\times\frac{a_2}{a_3} \tag{3.31}$$

จากสมการ (3.25) เมื่อทำการคูณตลอดทั้งสมการด้วยค่า $\frac{s^3R_2}{R_1+R_2}$ และทำการแปลงลาปลาซผกผันให้อยู่ในโดเมนเวลาเพื่อจัดรูปให้เป็นลักษณะเดียวกับสมการ (3.26) ซึ่งสามารถจัดรูปสมการได้ใหม่ดังสมการ (3.32)

$$v_o'''(t)+\frac{6}{\left(\frac{R_1+R_2}{R_1}\right)RC}v_o''(t)+\frac{5}{\left(\frac{R_1+R_2}{R_1}\right)R^2C^2}v_o'(t)+\frac{1}{\left(\frac{R_1+R_2}{R_1}\right)R^3C^3}v_o(t)=0 \tag{3.32}$$

จากสมการ (3.32) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมการ (3.28) และทำการแทนค่าลงไปในสมการ (3.31) จึงสามารถหาค่าเงื่อนไขที่ทำให้วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเฟส-ชิพออสซิลเลตและสามารถกำเนิดสัญญาณไซนูซอยดอลได้ดังสมการ (3.33)

$$\frac{1}{\left(\frac{R_1+R_2}{R_1}\right)R^3C^3}=\frac{6}{\left(\frac{R_1+R_2}{R_1}\right)RC}\times\frac{5}{\left(\frac{R_1+R_2}{R_1}\right)R^2C^2} \tag{3.33}$$

จากสมการ (3.33) เมื่อทำการแก้สมการจึงสามารถหาค่าเงื่อนไขในการออสซิลเลตของระบบได้คือ $R_2=29R_1$ และเมื่อทำการแก้สมการ (3.29) ใหม่ ดังนั้นจึงสามารถหาค่า m ได้ดังสมการ (3.34)

$$m_{1,2}=\pm kj=\pm\sqrt{\frac{a_1}{a_3}}j=\pm\sqrt{\frac{1}{6R^2C^2}}j \tag{3.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.34) เมื่อทำการแทนค่าเงื่อนไขในการออสซิลเลตของระบบและผลเฉลยคำตอบ $v_o(t) = Ae^{mt}$ จึงได้คำตอบของสมการอนุพันธ์ที่เป็นผลตอบสนองธรรมชาติดังสมการ (3.35)

$$v_o\left(t\right) = A_1 e^{m_1 t} + A_2 e^{m_2 t} = A_1 e^{j\frac{t}{\sqrt{6}RC}} + A_2 e^{-j\frac{t}{\sqrt{6}RC}} \tag{3.35}$$

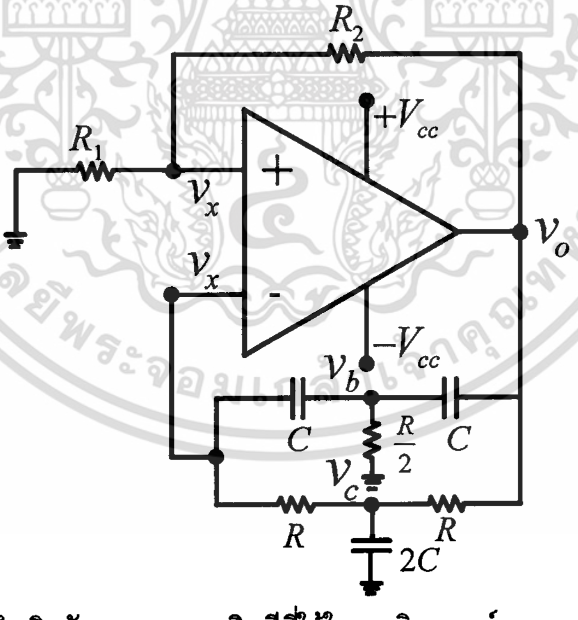
โดยที่ A_1 และ A_2 เป็นค่าคงที่ จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สำหรับในกรณีที่ $v_o\left(t\right)$ เป็นจำนวนจริง จึงให้ $A_1 = A_2 = A_x$ ทำให้สามารถเขียนสมการ (3.35) ได้ใหม่ดังนี้

$$v_o\left(t\right) = A_x e^{j\frac{t}{\sqrt{6}RC}} + A_x e^{-j\frac{t}{\sqrt{6}RC}} = 2A_x \cos\left(\frac{t}{\sqrt{6}RC}\right) \tag{3.36}$$

จากสมการ(3.36) จึงสามารถหาค่าความถี่ที่ถูกผลิตออกมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสภายใต้สภาวะที่ปราศจากอินพุตได้ดังสมการ (3.37)

$$f_{LO} = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} \tag{3.37}$$

3.3.1.3 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที



รูปที่ 3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติ

เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรจากรูปที่ 3.3 ด้วยการวิเคราะห์โหนดของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส เมื่อทำการวิเคราะห์สมการโหนดที่จุดรวม V_x , V_b , และ V_c ใน S - domain จึงได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการ (3.38)-(3.41) ตามลำดับ โดยที่ V_x คือแรงดันที่ขาลบและขาบวกของออป-แอมป์ , V_o คือแรงดันที่ขาเอาต์พุต

เอกสาร... ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\right)V_x(s)-\frac{V_o(s)}{R_2}=0 \quad (3.38)$$

$$2sCV_b(s)+2\frac{V_b(s)}{R}-sCV_x(s)-sCV_o(s)=0 \quad (3.39)$$

$$\frac{2V_c(s)}{R}+2sCV_c(s)-\frac{\left(V_x(s)+V_o(s)\right)}{R}=0 \quad (3.40)$$

$$sC\left(V_x(s)-V_b(s)\right)+\frac{V_x(s)-V_c(s)}{R}=0 \quad (3.41)$$

จากสมการ (3.38) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_x ได้ดังสมการ (3.42)

$$V_x(s)=\left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)V_o(s) \quad (3.42)$$

จากสมการ (3.39) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_b ได้ดังสมการ (3.43)

$$V_b(s)=\frac{sRC}{2(sRC+1)}\left(V_x(s)+V_o(s)\right) \quad (3.43)$$

จากสมการ (3.40) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_c ได้ดังสมการ (3.44)

$$V_c(s)=\frac{V_x(s)+V_o(s)}{2(sRC+1)} \quad (3.44)$$

เมื่อทำการแทนค่าสมการแรงดันรวมที่จุด V_x , V_b และ V_c จากสมการ (3.42), (3.43) และ (3.44) ลงในสมการ (3.41) จึงสามารถจัดรูปสมการได้ใหม่ดังสมการ (3.45)

$$s^2R^2C^2R_2V_o(s)-4sRCR_1V_o(s)+R_2V_o(s)=0 \quad (3.45)$$

ทำการแปลงลาปลาซผกผันจากสมการ (3.45) เพื่อทำการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาจึงสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.46)

$$R^2C^2R_2v_o''(t)-4RCR_1v_o'(t)+R_2v_o(t)=0 \quad (3.46)$$

จากสมการ (3.46) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธ์กับสมการอนุพันธ์อันดับสองจากสมการ (2.88) พบว่าค่าสัมประสิทธ์

$a_2=R^2C^2R_2$

$a_1=-4RCR_1$

$a_0=R_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่ทำให้วงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีสามารถออสซิลเลตเพื่อกำเนิดสัญญาณไซนูซอยดอลได้นั้นค่าสัมประสิทธ์ a_1 ของระบบต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งได้เงื่อนไขในการออสซิลเลตคือ $R_1 = 0$ และเมื่อทำการแทนค่าเงื่อนไขในการออสซิลเลตลงไปในสมการ (3.46) จึงสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการ (3.47)

$$v_o''(t) + \frac{R_2}{R^2C^2R_2} v_o(t) = 0 \tag{3.47}$$

จากสมการ (3.47) เมื่อทำการแทนค่าผลเฉลยคำตอบ $v_o(t) = Ae^{mt}$ และทำการแก้สมการโดยสามารถเขียนสมการคุณลักษณะเฉพาะ ได้ดังสมการ (3.48)

$$m^2 + \frac{R_2}{R^2C^2R_2} = 0 \tag{3.48}$$

เมื่อทำการแก้สมการ (3.48) และทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถหาค่าคำตอบได้ดังสมการ (3.49)

$$m_{1,2} = \pm\sqrt{\frac{1}{R^2C^2}}\,j \tag{3.49}$$

และสามารถแสดงคำตอบของสมการอนุพันธ์ที่เป็นผลตอบสนองธรรมชาติดังสมการ (3.50)

$$v_o(t) = A_1e^{m_1t} + A_2e^{m_2t} = A_1e^{j\frac{t}{RC}} + A_2e^{-j\frac{t}{RC}} \tag{3.50}$$

โดยที่ A_1 และ A_2 เป็นค่าคงที่ จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สำหรับในกรณีที่ $v_o(t)$ เป็นจำนวนจริง จึงให้ $A_1 = A_2 = A_x$ ทำให้สามารถเขียนสมการ (3.50) ได้ใหม่ดังนี้

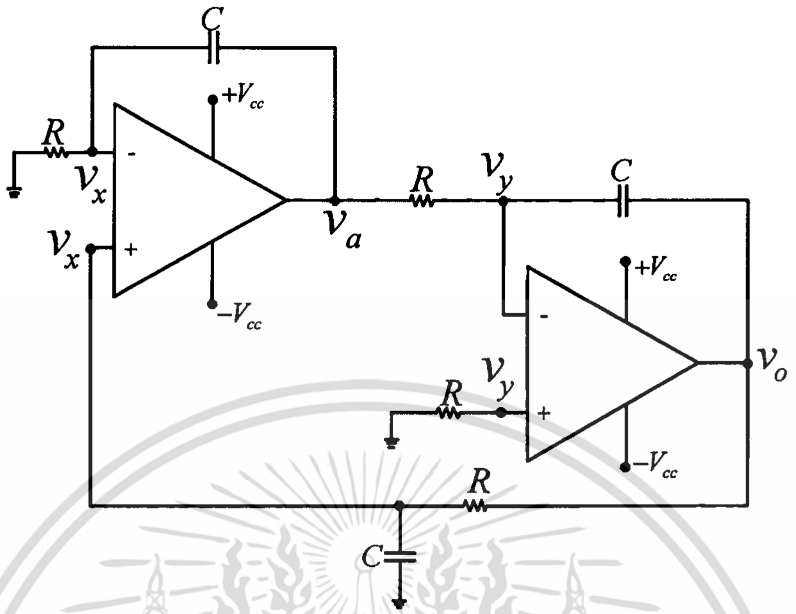
$$v_o(t) = A_xe^{j\frac{t}{RC}} + A_xe^{-j\frac{t}{RC}} = 2A_x\cos\left(\frac{t}{RC}\right) \tag{3.51}$$

จากสมการ(3.51) จึงสามารถหาค่าความถี่ที่ถูกผลิตออกมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีภายใต้สภาวะที่ปราศจากอินพุตบังคับได้ดังสมการ (3.52)

$$f_{LO} = \frac{1}{2\pi RC} \tag{3.52}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.4 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์



รูปที่ 3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติ

เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรจากรูปที่ 3.4 ด้วยการวิเคราะห์โหนดของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ เมื่อทำการวิเคราะห์สมการโหนดที่จุดรวม V_a, V_x และ V_y ใน S - domain จึงได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการ (3.53), (3.54) และ (3.55) ตามลำดับโดยที่ V_x และ V_y คือแรงดันที่ขาลบและขาบวกของออป-แอมป์ V_o คือ แรงดันที่ขาเอาต์พุต

$$\frac{V_x(s)}{R} + sC\big(V_x(s) - V_a(s)\big) = 0 \tag{3.53}$$

$$sCV_x(s) + \frac{V_x(s) - V_o(s)}{R} = 0 \tag{3.54}$$

$$sC\big(V_y(s) - V_o(s)\big) + \frac{V_y(s) - V_a(s)}{R} = 0 \tag{3.55}$$

จากสมการ (3.53) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_a ได้ดังสมการ (3.56)

$$V_a(s) = \left(\frac{sRC + 1}{sRC}\right) V_x(s) \tag{3.56}$$

จากสมการ (3.54) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_x ได้ดังสมการ (3.57)

$$V_x(s) = \left(\frac{1}{sRC + 1}\right) V_o(s) \tag{3.57}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการแทนค่าสมการแรงดันรวมที่จุด V_a และ V_x จากสมการ (3.56) และ (3.57) ลงในสมการ (3.55) และเนื่องจากค่าแรงดันรวมที่จุด V_y (ขาบวกของออปแอมป์) มีค่าเท่ากับศูนย์ จึงทำให้สามารถจัดรูปสมการออกมาได้ใหม่ดังสมการ (3.58)

$$s^2R^2C^2\,V_o(s)+V_o(s)=0 \tag{3.58}$$

เมื่อทำการแปลงลาปลาซผกผันจากสมการ (3.58) เพื่อทำการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาจึงสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.59)

$$R^2C^2v_o''(t)+v_o(t)=0 \tag{3.59}$$

จากสมการ (3.59) เมื่อทำการแทนค่าผลเฉลยคำตอบ $v_o(t)=Ae^{mt}$ และทำการแก้สมการโดยสามารถเขียนสมการคุณลักษณะเฉพาะ ได้ดังสมการ (3.60)

$$m^2+\frac{1}{R^2C^2}=0 \tag{3.60}$$

เมื่อทำการแก้สมการ (3.60) และทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถหาค่าคำตอบได้ดังสมการ (3.61)

$$m_{1,2}=\pm\sqrt{\frac{1}{R^2C^2}}\,j \tag{3.61}$$

และสามารถแสดงคำตอบของสมการอนุพันธ์ที่เป็นผลตอบสนองธรรมชาติดังสมการ (3.61)

$$v_o(t)=A_1e^{m_1t}+A_2e^{m_2t}=A_1e^{j\frac{t}{RC}}+A_2e^{-j\frac{t}{RC}} \tag{3.62}$$

โดยที่ A_1 และ A_2 เป็นค่าคงที่ จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สำหรับในกรณีที่ $v_o(t)$ เป็นจำนวนจริง จึงให้ $A_1=A_2=A_x$ ทำให้สามารถเขียนสมการ (3.62) ได้ใหม่ดังนี้

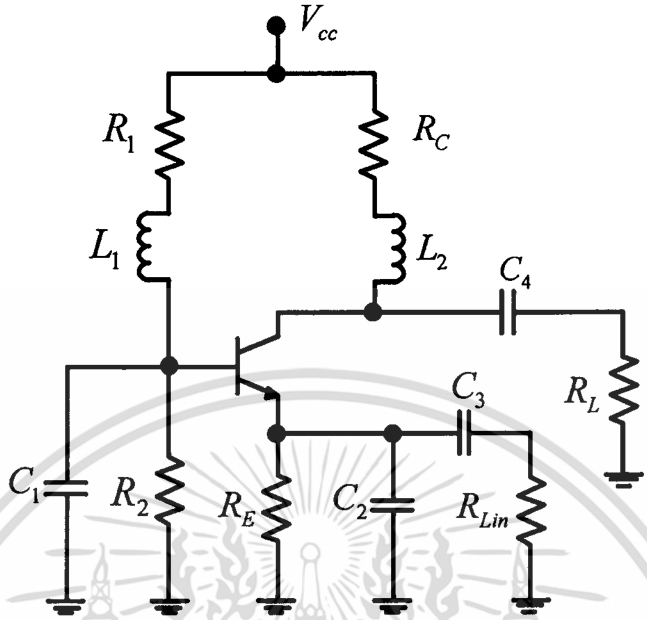
$$v_o(t)=A_xe^{j\frac{t}{RC}}+A_xe^{-j\frac{t}{RC}}=2A_x\cos\left(\frac{t}{RC}\right) \tag{3.63}$$

จากสมการ(3.63) จึงสามารถหาค่าความถี่ที่ถูกผลิตออกมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากอินพุตบังคับได้ดังสมการ (3.64)

$$f_{LO}=\frac{1}{2\pi RC} \tag{3.64}$$

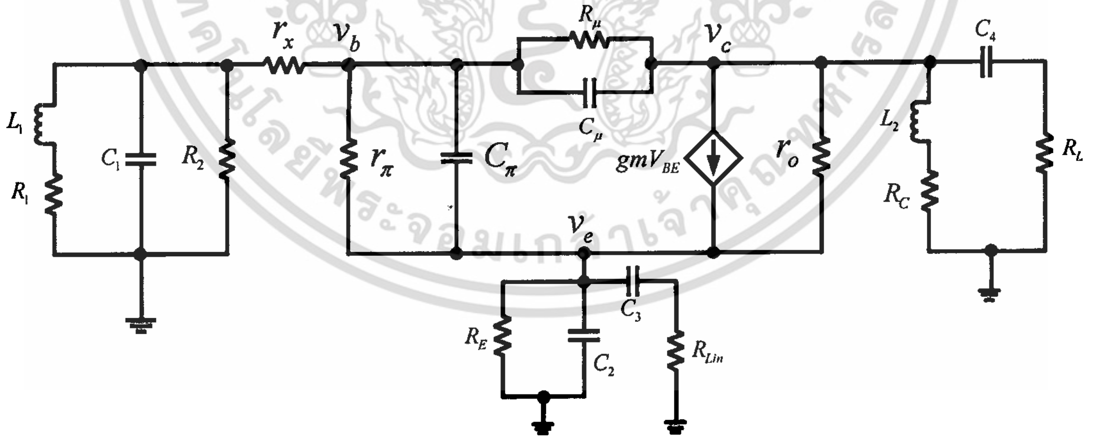
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.5 วงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์



รูปที่ 3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองธรรมชาติ

เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรจากรูปที่ 3.5 ทำให้สามารถวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ด้วยวงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กความถี่สูงได้ดังรูปที่ 3.6

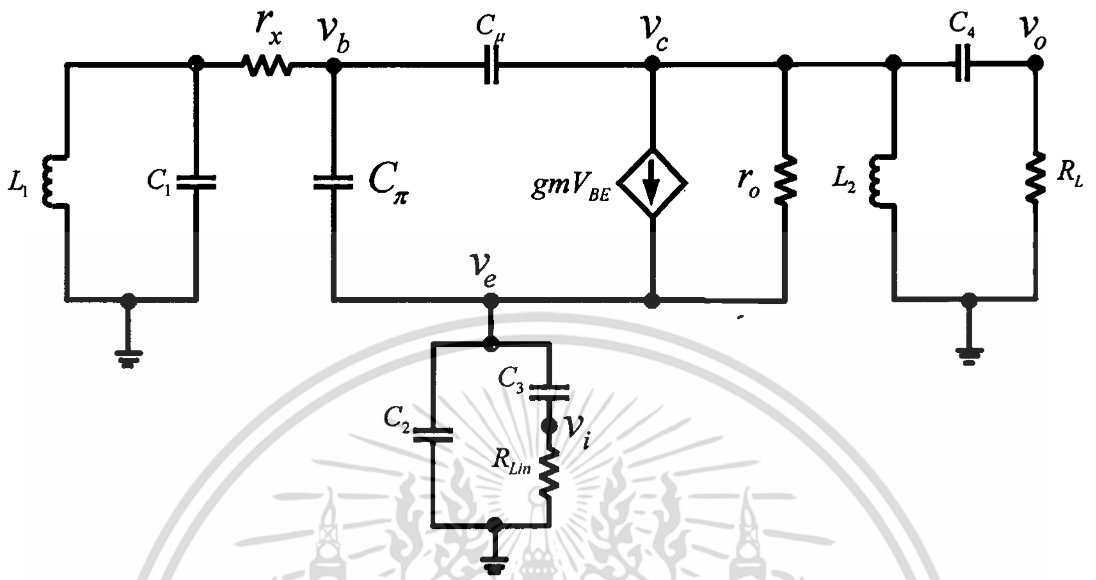


รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กความถี่สูง

โดยค่าอิมพีแดนซ์ของ $R_E // Z_{C_2}$ จะสามารถประมาณค่าได้เป็น Z_{C_2} เนื่องจากที่ความถี่สูงทำให้ค่า Z_{C_2} มีค่าน้อยมาก และสามารถประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของ $r_\mu // Z_{C_\mu}$ ได้เท่ากับ Z_{C_μ} และ $r_\pi // Z_{C_\pi}$ ได้เท่ากับ Z_{C_π} และ $R_2 // Z_{C_1}$ ได้เท่ากับ Z_{C_1} ในส่วนของ L_1 และ L_2 ที่ต่ออนุกรมกับ R_1 และ R_C ตามลำดับ สามารถประมาณค่าอิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ Z_{L_1} และ Z_{L_2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ Z_{L_1} และ Z_{L_2} นั้นมีค่ามากเมื่อความถี่สูงขึ้น ทำให้สามารถลดรูปของวงจรในรูปที่ 3.6 ได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กความถี่สูงที่ลดรูปแล้ว

เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 3.7 จึงให้ Z_x คือค่าอิมพีแดนซ์ของ $Z_{L_1} // Z_{C_1}$ และ Z_1 คือค่าอิมพีแดนซ์ของ Z_x ที่ต่ออนุกรมกับ r_x ดังนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์สมการโหนดที่จุดรวม V_b, V_i, V_e, V_c และ V_o ใน S - domain ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการ (3.65)-(3.69) ตามลำดับ โดยที่ V_i คือค่าแรงดันที่ขาอินพุต, V_b คือแรงดันที่ขาเบส, V_e คือแรงดันที่ขาอิมิตเตอร์, V_c คือแรงดันที่ขาคอลเลคเตอร์และ V_o คือแรงดันที่ขาเอาต์พุตตามลำดับ

$$\frac{V_b(s)}{Z_1}+\frac{V_b(s)-V_c(s)}{Z_{C_\mu}}+\frac{V_b(s)-V_e(s)}{Z_{C_\pi}}=0 \qquad (3.65)$$

$$\frac{V_i(s)}{R_{Lin}}+\frac{V_i(s)-V_e(s)}{Z_{C_3}}=0 \qquad (3.66)$$

$$\frac{V_e(s)}{Z_{C_2}}+\frac{V_e(s)-V_i(s)}{Z_{C_3}}+\frac{V_e(s)-V_b(s)}{Z_{C_\pi}}+\frac{V_e(s)-V_c(s)}{r_o}-g_mV_{be}=0 \qquad (3.67)$$

$$\frac{V_c(s)}{Z_{L_2}}+\frac{V_c(s)-V_o(s)}{Z_{C_4}}+\frac{V_c(s)-V_b(s)}{Z_{C_\mu}}+\frac{V_c(s)-V_e(s)}{r_o}+g_mV_{be}=0 \qquad (3.68)$$

$$\frac{V_o(s)}{R_L}+\frac{V_o(s)-V_c(s)}{Z_{C_4}}=0 \qquad (3.69)$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการ (3.65) ใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันที่จุดรวม V_b ได้ดังสมการที่ (3.70)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_b(s)=\left(\frac{Z_1Z_{C_\pi}Z_{C_\mu}}{Z_1Z_{C_\mu}+Z_1Z_{C_\pi}+Z_{C_\mu}Z_{C_\pi}}\right)\left(\frac{V_c(s)}{Z_{C_\mu}}+\frac{V_e(s)}{Z_{C_\pi}}\right) \tag{3.70}$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการ (3.66) ใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันที่จุดรวม V_e ได้ดังสมการที่ (3.71)

$$V_e(s)=\left(\frac{R_{Lin}+Z_{C_3}}{R_{Lin}}\right)V_i(s) \tag{3.71}$$

จากสมการ (3.69) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่สามารถแสดงแรงดันที่จุดรวม V_c ได้ดังสมการ(3.72)

$$V_c(s)=\left(\frac{R_L+Z_{C_4}}{R_L}\right)V_o(s) \tag{3.72}$$

เมื่อนำสมการ (3.65), (3.66), (3.67), (3.68) และสมการ (3.69) มาบวกกันจึงสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการ (3.73)

$$\frac{V_i(s)}{R_{Lin}}+\frac{V_e(s)}{Z_{C_2}}+\frac{V_b(s)}{Z_1}+\frac{V_c(s)}{Z_{L_2}}+\frac{V_o(s)}{R_L}=0 \tag{3.73}$$

เมื่อทำการแทนค่าแรงดันรวมที่จุด V_b จากสมการ (3.70) ลงในสมการ (3.73) จึงสามารถแสดงสมการใหม่ได้ดังสมการ (3.74)

$$\begin{aligned}&\left(\frac{Z_{C_\mu}}{Z_1Z_{C_\mu}+Z_1Z_{C_\pi}+Z_{C_\mu}Z_{C_\pi}}\right)V_e(s)+\left(\frac{Z_{C_\pi}}{Z_1Z_{C_\mu}+Z_1Z_{C_\pi}+Z_{C_\mu}Z_{C_\pi}}\right)V_c(s)\\&+\frac{V_e(s)}{Z_{C_2}}+\frac{V_c(s)}{Z_{L_2}}+\frac{V_i(s)}{R_{Lin}}+\frac{V_o(s)}{R_L}=0\end{aligned} \tag{3.74}$$

และหากทำการแทนค่าแรงดันรวมที่จุด V_e ในสมการ (3.71) และแรงดันรวมที่จุด V_c ในสมการ (3.72) ลงในสมการ (3.73) จึงสามารถแสดงสมการใหม่ได้ดังสมการ (3.75)

$$\begin{aligned}&\frac{V_o(s)}{R_L}+\left(\frac{Z_{C_\pi}\left(R_L+Z_{C_4}\right)}{R_L\left(Z_1Z_{C_\mu}+Z_1Z_{C_\pi}+Z_{C_\mu}Z_{C_\pi}\right)}\right)V_o(s)+\left(\frac{R_L+Z_{C_4}}{Z_{L_2}R_L}\right)V_o(s)\\&=-\frac{V_i(s)}{R_{Lin}}-\left(\frac{Z_{C_\mu}\left(R_{Lin}+Z_{C_3}\right)}{R_{Lin}\left(Z_1Z_{C_\mu}+Z_1Z_{C_\pi}+Z_{C_\mu}Z_{C_\pi}\right)}\right)V_i(s)-\left(\frac{R_{Lin}+Z_{C_3}}{Z_{C_2}R_{Lin}}\right)V_i(s)\end{aligned} \tag{3.75}$$

เมื่อทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุด้วย $Z_C=\frac{1}{sC}$ และตัวเหนี่ยวนำด้วย $Z_L=sL$ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของ Z_1 ที่เป็นการขนานระหว่าง C_1 และ L_1 ที่ต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุกรมเข้ากับ r_x หรืออาจกล่าวได้ว่า $r_x + (C_1 // L_1)$ นั่นเองและเนื่องจาก r_x นั้นมีค่าน้อยมากจึงทำการละทิ้งค่า r_x ดังนั้นจึงได้ค่าอิมพีแดนซ์ของ Z_1 ดังสมการ (3.76)

$$Z_1 = \frac{sL_1}{s^2 C_1 L_1 + 1} \tag{3.76}$$

เมื่อทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์ของ Z_1 ดังสมการ (3.76) ลงในสมการ (3.75) พร้อมทั้งแทนค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในสมการ (3.75) และเมื่อประมาณค่าผลที่มีค่าน้อยทิ้งไป โดยในการพิจารณาผลตอบสนองธรรมชาตินั้นคือการที่ไม่มีอินพุตป้อนเข้ามาในระบบนั่นคือ $V_i(s) = 0$ ดังสมการที่ (3.77)

$$s^3 K_1 V_o(s) + s^2 K_2 V_o(s) + sK_3 V_o(s) + K_4 V_o(s) = 0 \tag{3.77}$$

เมื่อกำหนดให้ค่า

$$K_1 = C_4^2 C_\mu C_\pi L_2 R_L + C_4^2 C_\pi L_1 R_L \left(C_\mu + C_\pi + C_1\right)$$
$$K_2 = C_4 C_\mu C_\pi L_2 + C_4^2 C_\pi L_2 + C_4 C_\pi L_1 \left(C_\mu + C_\pi + C_1\right)$$
$$K_3 = C_4^2 C_\pi R_L$$
$$K_4 = C_4 C_\pi$$

เมื่อทำการแปลงลาปลาซผกผันจากสมการ (3.77) เพื่อทำการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.78)

$$K_1 v_o'''(t) + K_2 v_o''(t) + K_3 v_o'(t) + K_4 v_o(t) = 0 \tag{3.78}$$

เพื่อทำการวิเคราะห์หาผลตอบสนองธรรมชาติจึงได้นำสมการอนุพันธ์อันดับสามมาใช้ในการวิเคราะห์และทำการแก้สมการอนุพันธ์ด้วยการแทนสมการคุณลักษณะได้สมการ (3.79)

$$K_1 m^3 + K_2 m^2 + K_3 m + K_4 = 0 \tag{3.79}$$

เมื่อนำ K_1 หารสมการ (3.79) จึงสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการ (3.80)

$$m^3 + \frac{K_2}{K_1} m^2 + \frac{K_3}{K_1} m + \frac{K_4}{K_1} = 0 \tag{3.80}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการพหุนามกำลังสามและกำหนดให้มีคู่สังยุคคู่หนึ่งซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ (3.81)

$$(m + aj)(m - aj)(m + b) = 0 \tag{3.81}$$

เมื่อทำการคูณกระจายในสมการ (3.81) และทำการจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการ (3.82)

$$m^3 + bm^2 + a^2 m + a^2 b = 0 \tag{3.82}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สมการ (3.77) กับสมการ (3.82) จึงสามารถเทียบได้ว่า $\frac{K_2}{K_1}=b$, $\frac{K_3}{K_1}=a^2$ และ $\frac{K_4}{K_1}=a^2b$ ซึ่งเงื่อนไขที่จะทำให้การแทนสัมประสิทธิ์เหล่านี้เป็นจริงต้องให้ $\frac{K_4}{K_1}=\frac{K_2K_3}{K_1^2}$ โดยเมื่อทำการแก้สมการ (3.81) โดยนำ $(m+b)$ หารทั้งสมการจึงได้

$$(m+aj)(m-aj)=0 \tag{3.83}$$

ดังนั้น m จึงมีค่าดังสมการ (3.84)

$$m_{1,2}=\pm aj=\pm\sqrt{\frac{K_3}{K_1}}j \tag{3.84}$$

จากสมการ (3.84) จึงได้คำตอบของสมการอนุพันธ์ที่เป็นผลตอบสนองธรรมชาติ $v_o(t)$ เป็นสมการ (3.85)

$$v_o(t)=C_1e^{jat}+C_2e^{-jat}=C_1e^{j\sqrt{\frac{K_3}{K_1}}t}+C_2e^{-j\sqrt{\frac{K_3}{K_1}}t} \tag{3.85}$$

โดยที่ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สำหรับในกรณีที่ $v_o(t)$ เป็นจำนวนจริง จึงให้ $C_1=C_2=C_x$ ทำให้สามารถเขียนสมการ (3.85) ได้ใหม่ดังนี้

$$v_o(t)=C_xe^{j\sqrt{\frac{K_3}{K_1}}t}+C_xe^{-j\sqrt{\frac{K_3}{K_1}}t}=2C_x\cos\left(\sqrt{\frac{K_3}{K_1}}t\right) \tag{3.86}$$

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าผลตอบสนองธรรมชาติของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ โดยที่ค่าความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากอินพุตบังคับสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.87)

$$f_n=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_3}{K_1}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C_4^2C_\pi R_L}{C_4^2C_\mu C_\pi L_2R_L+C_4^2C_\pi L_1R_L\left(C_\mu+C_\pi+C_1\right)}} \tag{3.87}$$

เมื่อทำการประมาณค่าอุปกรณ์ที่มีผลน้อยต่อการผลิตความถี่ทิ้งไป โดยที่ค่า C_1 และ C_4 มีค่ามากกว่า C_μ และ C_π ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่าความถี่ที่ผลิตออกมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ได้ดังสมการ (3.88)

$$f_{LO}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1\left(C_\pi+C_\mu+C_1\right)}} \tag{3.88}$$

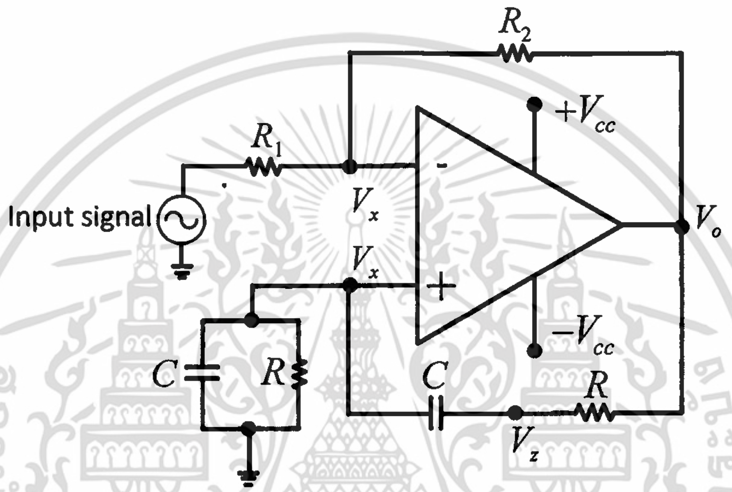
3.3.2 วิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับ

จากการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าอันดับสองโดยได้ทำการพิจารณาระบบเฉพาะในส่วนของผลตอบสนองธรรมชาติที่ปราศจากอินพุตบังคับหรือกล่าวได้ว่าค่าอินพุตของระบบเป็นศูนย์ สำหรับลำดับถัดมาจึงได้ทำการป้อนอินพุตให้กับวงจรไฟฟ้าอันดับสอง เพื่อแสดงการประยุกต์หลักการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณภายใต้สภาวะอินพุตบังคับ จึงต้องหาผลตอบสนองบังคับของวงจรกำเนิดสัญญาณทั้งในความถี่ต่ำและความถี่สูงเสียก่อน สามารถแสดงการวิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับของวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำได้ยกตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ เลื่อนเฟส ทวินที และ ควอดราเจอร์ และวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่สูงได้ยกตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ได้ดังต่อไปนี้

3.3.2.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์



รูปที่ 3.8 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับ

จากการป้อนสัญญาณอินพุตไปที่วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ขาลบของออป-แอมป์ ดังรูปที่ 3.8 เมื่อทำการวิเคราะห์โหนดที่จุดร่วม V_x , V_z และ V_i ใน S - domain ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกป้อนอินพุตจึงได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการ (3.89), (3.90) และ (3.91) ตามลำดับโดยที่ V_x คือแรงดันที่ขาลบและขาบวกของออป-แอมป์ V_o คือแรงดันที่ขาเอาต์พุตและ V_i คือแรงดันที่ขาอินพุต

$$\frac{V_x(s)-V_i(s)}{R_1}+\frac{V_x(s)-V_o(s)}{R_2}=0 \tag{3.89}$$

$$\frac{2V_x(s)-V_z(s)}{R}+sCV_x(s)=0 \tag{3.90}$$

$$\frac{V_z(s)-V_x(s)}{R}+sC\left(V_z(s)-V_o(s)\right)=0 \tag{3.91}$$

จากสมการ (3.89) จึงสามารถหาสมการแรงดันรวม V_x ได้ดังสมการ (3.92)

$$V_x(s)=\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)V_i(s)+\left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)V_o(s) \tag{3.92}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.90) จึงสามารถหาสมการแรงดันรวม V_z ได้ดังสมการ (3.93)

$$V_z(s)=\left(\frac{2R_2+sR_2RC}{R_1+R_2}\right)V_i(s)+\left(\frac{2R_1+sR_1RC}{R_1+R_2}\right)V_o(s) \tag{3.93}$$

จากสมการ (3.91) แทนค่า V_x และ V_z แล้วจัดรูปสมการใหม่ดังสมการ (3.94)

$$\left(s^2R_2R^2C^2+3sR_2RC+R_2\right)V_i(s)+\left(s^2R_1R^2C^2+2sR_1RC-sR_2RC+R_1\right)V_o(s)=0 \tag{3.94}$$

เมื่อทำการแทนค่าเงื่อนไขในการออสซิเลตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ $R_2=2R_1$ ในสมการ (3.94) และทำการจัดรูปสมการใหม่ ซึ่งสามารถหาฟังก์ชั่นส่งผ่านของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ได้ดังสมการ (3.95)

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)}=\frac{-2\left(s^2R^2C^2+3sRC+1\right)}{\left(s^2R^2C^2+1\right)} \tag{3.95}$$

จากสมการ (3.95) เมื่อทำการจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ $a+jb$ ได้ดังสมการ (3.96)

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)}=\frac{2\omega^2R^2C^2+2}{\left(\omega^2R^2C^2-1\right)}+\frac{j6\omega RC}{\left(\omega^2R^2C^2-1\right)} \tag{3.96}$$

และสามารถหาขนาดและเฟสของฟังก์ชั่นส่งผ่าน $V_o(s)/V_i(s)$ สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ได้ดังสมการ (3.97)

$$M(\omega)=A_w=\sqrt{\frac{4\omega^4R^4C^4+44\omega^2R^2C^2+4}{\omega^4R^4C^4-2\omega^2R^2C^2+1}}$$
$$\angle\phi_w(\omega)=\tan^{-1}\left(\frac{6\omega RC}{2\omega^2R^2C^2+2}\right) \tag{3.97}$$

เพื่อให้ง่ายต่อการแสดงการวิเคราะห์จึงได้กำหนดให้สัญญาณอินพุตดังสมการ(3.98) เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยที่ A_f และ ω_f คือขนาดและความถี่ของสัญญาณคลื่นรูปไซน์

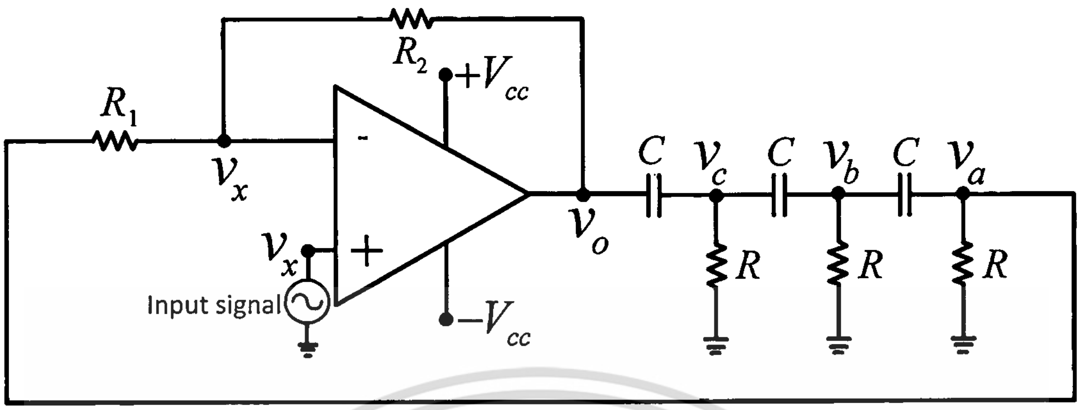
$$v_i(\tau)=A_f\cos(\omega_f\tau) \tag{3.98}$$

เมื่อทำการป้อนอินพุตบังคับ $v_i(\tau)$ ดังสมการ (3.98) เข้าไปในวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ ซึ่งได้ค่าผลตอบสนองบังคับดังสมการ (3.99)

$$v_{of}(\tau)=A_WA_f\cos(\omega_f\tau+\angle\phi_W(\omega)) \tag{3.99}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.2 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส



รูปที่ 3.9 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับ

จากการป้อนสัญญาณอินพุตไปที่วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ขาบวกของออป-แอมป์ ดังรูปที่ 3.9 เมื่อทำการวิเคราะห์โหนดที่จุดรวม V_x , V_a , V_b , V_c และ V_i ใน S - domain ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกป้อนอินพุตจึงได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการ (3.100) - (3.103) ตามลำดับ โดยที่ V_x คือแรงดันที่ขาลบและขาบวกของออป-แอมป์ V_o คือแรงดันที่ขาเอาต์พุตและ V_i คือแรงดันที่ขาอินพุต

$$\frac{V_i(s)-V_a(s)}{R_1}+\frac{V_i(s)-V_o(s)}{R_2}=0 \tag{3.100}$$

$$\frac{V_a(s)-V_i(s)}{R_1}+\frac{V_a(s)}{R}+sC(V_a(s)-V_b(s))=0 \tag{3.101}$$

$$\frac{V_b(s)}{R}+sC\left(V_b(s)-V_a(s)\right)+sC\left(V_b(s)-V_c(s)\right)=0 \tag{3.102}$$

$$\frac{V_c(s)}{R}+sC\left(V_c(s)-V_b(s)\right)+sC\left(V_c(s)-V_o(s)\right)=0 \tag{3.103}$$

จากสมการ (3.100) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_a ได้ดังสมการ (3.104)

$$V_a(s)=\left(\frac{R_1+R_2}{R_2}\right)V_i(s)-\left(\frac{R_1}{R_2}\right)V_o(s) \tag{3.104}$$

จากสมการ (3.101) เมื่อประมาณค่าให้ $\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R}\right)\approx\frac{1}{R}$ และทำการแทนค่าสมการแรงดันรวมที่จุด V_a จึงสามารถจัดรูปสมการได้ใหม่และสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_b ได้ดังสมการ (3.105)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_b(s)=\left(\left(\frac{R_1+R_2}{sR_2RC}\right)+\left(\frac{R_1+R_2}{R_2}\right)-\left(\frac{1}{sR_1C}\right)\right)V_i(s)-\left(\left(\frac{R_1}{sR_2RC}\right)+\left(\frac{R_1}{R_2}\right)\right)V_o(s) \qquad (3.105)$$

จากสมการ (3.102) เมื่อทำการแทนค่าสมการแรงดันรวมที่จุด V_a และ V_b เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_c ได้ดังสมการ (3.106)

$$\begin{aligned}V_c(s)=&\left(\left(\frac{R_1+R_2}{s^2R_2R^2C^2}\right)-\left(\frac{1}{s^2R_1RC^2}\right)+3\left(\frac{R_1+R_2}{sR_2RC}\right)-\left(\frac{2}{sR_1C}\right)+\left(\frac{R_1+R_2}{R_2}\right)\right)V_i(s)\\&-\left(\left(\frac{R_1}{s^2R_2R^2C^2}\right)+3\left(\frac{R_1}{sR_2RC}\right)+\left(\frac{R_1}{R_2}\right)\right)V_o(s)\end{aligned} \qquad (3.106)$$

จากสมการ (3.103) เมื่อทำการแทนค่าสมการแรงดันรวมที่จุด V_b และ V_c ในสมการ (3.105) และ (3.106) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ จึงสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.107)

$$\begin{aligned}&\left(\begin{aligned}&\left(\frac{R_1+R_2}{s^3R_2R^3C^3}\right)-\left(\frac{1}{s^3R_1R^2C^3}\right)+5\left(\frac{R_1+R_2}{s^2R_2R^2C^2}\right)\\&-4\left(\frac{1}{s^2R_1RC^2}\right)+6\left(\frac{R_1+R_2}{sR_2RC}\right)-3\left(\frac{1}{sR_1C}\right)+\left(\frac{R_1+R_2}{R_2}\right)\end{aligned}\right)V_i(s)\\&-\left(\left(\frac{R_1}{s^3R_2R^3C^3}\right)+5\left(\frac{R_1}{s^2R_2R^2C^2}\right)+6\left(\frac{R_1}{sR_2RC}\right)+\left(\frac{R_1+R_2}{R_2}\right)\right)V_o(s)=0\end{aligned} \qquad (3.107)$$

เมื่อนำค่า $s^3R^3C^3R_2$ คูณตลอดทั้งสมการ (3.107) และทำการแทนค่าเงื่อนไขในการออสซิลเลตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส $R_2=29R_1$ เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ จึงสามารถหาฟังก์ชั่นส่งผ่านของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสได้ดังสมการ (3.105)

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)}=\frac{\left(30s^3R^3C^3R_1+180s^2R^2C^2R_1-87s^2R^3C^2+150sRCR_1-116sR^2C+30R_1-29R\right)}{\left(30s^3R^3C^3R_1+6s^2R^2C^2R_1+5sRR_1C+R_1\right)} \qquad (3.108)$$

จากสมการ (3.108) เมื่อทำการจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ $a+jb$ ได้ดังสมการ (3.109)

$$\begin{aligned}\frac{V_o(s)}{V_i(s)}=&\frac{\left(\begin{aligned}&900\omega^6R^6C^6R_1^2-3570\omega^4R^4C^4R_1^2-\omega^4R^5C^4\left(522R_1^2-3480\right)\\&+390\omega^2R^2C^2R_1^2-319\omega^2R^3C^2R_1+30R_1^2-29RR_1\end{aligned}\right)}{\left(-900\omega^6R^6C^6R_1^2-264\omega^4R^4C^4R_1^2+13\omega^2R^2C^2R_1^2+R_1^2\right)}\\&+\frac{j\left(5220\omega^5R^5C^5R_1^2-2610\omega^5R^6C^5R_1+609\omega^3R^4C^3R_1-870\omega^3R^3C^3R_1^2-29\omega R^2CR_1\right)}{\left(-900\omega^6R^6C^6R_1^2-264\omega^4R^4C^4R_1^2+13\omega^2R^2C^2R_1^2+R_1^2\right)}\end{aligned} \qquad (3.109)$$

โดยทำการกำหนดให้ค่า

$$R=\frac{\left(\begin{aligned}&900\omega^6R^6C^6R_1^2-3570\omega^4R^4C^4R_1^2-\omega^4R^5C^4\left(522R_1^2-3480\right)\\&+390\omega^2R^2C^2R_1^2-319\omega^2R^3C^2R_1+30R_1^2-29RR_1\end{aligned}\right)}{\left(-900\omega^6R^6C^6R_1^2-264\omega^4R^4C^4R_1^2+13\omega^2R^2C^2R_1^2+R_1^2\right)}$$

$$I=\frac{\left(5220\omega^5R^5C^5R_1^2-2610\omega^5R^6C^5R_1+609\omega^3R^4C^3R_1-870\omega^3R^3C^3R_1^2-29\omega R^2CR_1\right)}{\left(-900\omega^6R^6C^6R_1^2-264\omega^4R^4C^4R_1^2+13\omega^2R^2C^2R_1^2+R_1^2\right)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

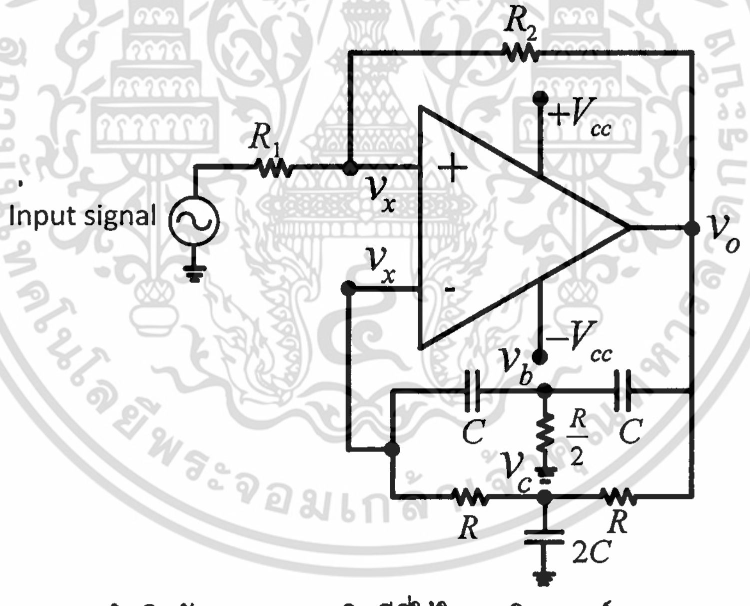
ซึ่งสามารถหาขนาดและเฟสของฟังก์ชั่นส่งผ่าน $V_o(s)/V_i(s)$ สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสได้ดังสมการ (3.110)

$$M(\omega) = A_P = \sqrt{R^2 + I^2}$$
$$\angle\phi_P(\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{I}{R}\right) \tag{3.110}$$

เพื่อให้ง่ายต่อการแสดงการวิเคราะห์จึงได้กำหนดให้สัญญาณอินพุต $v_i(\tau) = A_f \cos(\omega_f \tau)$ เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยที่ A_f และ ω_f คือขนาดและความถี่ของสัญญาณคลื่นรูปไซน์และเมื่อทำการป้อนอินพุต $v_i(\tau)$ เข้าไปในวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส จึงได้ค่าผลตอบสนองบังคับดังสมการ (3.111)

$$v_{of}(\tau) = A_P A_f \cos(\omega_f \tau + \angle\phi_P(\omega)) \tag{3.111}$$

3.3.2.3 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที



รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับ

จากการป้อนสัญญาณอินพุตไปที่วงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ขาบวกของออป-แอมป์ ดังรูปที่ 3.10 เมื่อทำการวิเคราะห์โหนดที่จุดรวม V_x , V_b , V_c และ V_i ใน S - domain ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ถูกป้อนอินพุตจึงได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการ (3.112) - (3.115) ตามลำดับโดยที่ V_x คือแรงดันที่ขาลบและขาบวกของออป-แอมป์ V_o คือ แรงดันที่ขาเอาต์พุตและ V_i คือแรงดันที่ขาอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_x(s)-V_i(s)}{R_1}+\frac{V_x(s)-V_o(s)}{R_2}=0 \qquad (3.112)$$

$$sC\left(V_b(s)-V_x(s)\right)+2\frac{V_b(s)}{R}+sC\left(V_b(s)-V_o(s)\right)=0 \qquad (3.113)$$

$$\frac{V_c(s)-V_x(s)}{R}+2sCV_c(s)+\frac{V_c(s)-V_o(s)}{R}=0 \qquad (3.114)$$

$$sC\left(V_x(s)-V_b(s)\right)+\frac{V_x(s)-V_c(s)}{R}=0 \qquad (3.115)$$

จากสมการ (3.112) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_x ได้ดังสมการ (3.116)

$$V_x(s)=\left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)V_o(s)+\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)V_i(s) \qquad (3.116)$$

จากสมการ (3.113) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_b ได้ดังสมการ (3.117)

$$V_b(s)=\frac{sRC}{2(sRC+1)}\left(V_x(s)+V_o(s)\right) \qquad (3.117)$$

จากสมการ (3.114) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_c ได้ดังสมการ (3.118)

$$V_c(s)=\frac{V_x(s)+V_o(s)}{2(sRC+1)} \qquad (3.118)$$

เมื่อทำการแทนค่าสมการแรงดันรวมที่จุด V_x , V_b และ V_c จากสมการ (3.116), (3.117) และ (3.118) ลงในสมการ (3.115) จึงสามารถจัดรูปสมการได้ใหม่ดังสมการ (3.119)

$$\left(s^2R^2C^2R_2+4sRCR_2+R_2\right)V_i(s)-\left(s^2R^2C^2R_2-4sRCR_1+R_2\right)V_o(s)=0 \qquad (3.119)$$

เมื่อทำการแทนค่าเงื่อนไขในการออสซิเลตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที $R_1=0$ ในสมการ (3.119) และทำการจัดรูปสมการใหม่ ซึ่งสามารถหาฟังก์ชั่นส่งผ่านของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีได้ดังสมการ (3.120)

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)}=\frac{\left(s^2R^2C^2+4sRC+1\right)}{\left(s^2R^2C^2+1\right)} \qquad (3.120)$$

จากสมการ (3.120) เมื่อทำการจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ $a+jb$ ได้ดังสมการ (3.121)

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)}=\frac{-\omega^2R^2C^2+1}{\left(-\omega^2R^2C^2+1\right)}+\frac{j4\omega RC}{\left(-\omega^2R^2C^2+1\right)} \qquad (3.121)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

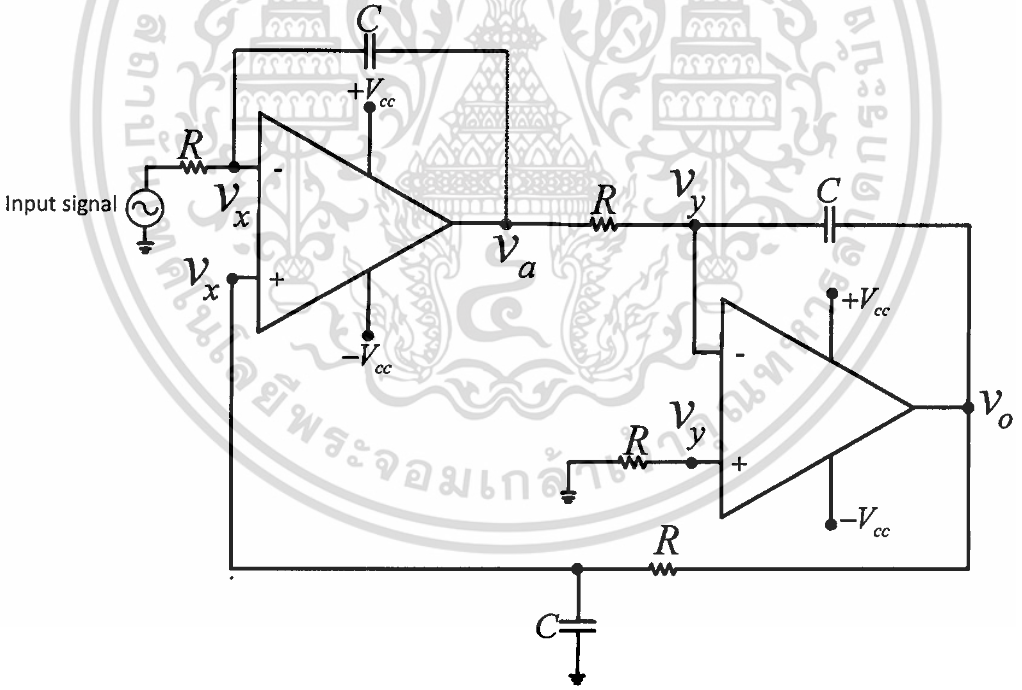
ซึ่งสามารถหาขนาดและเฟสของฟังก์ชั่นส่งผ่าน $V_o(s)/V_i(s)$ สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีได้ดังสมการ (3.122)

$$
\begin{aligned}
M(\omega) = A_T &= \sqrt{\frac{\omega^4R^4C^4 + 14\omega^2R^2C^2 + 1}{\omega^4R^4C^4 - 2\omega^2R^2C^2 + 1}} \\
\angle\phi_T(\omega) &= \tan^{-1}\left(\frac{4\omega RC}{-\omega^2R^2C^2 + 1}\right)
\end{aligned}
\tag{3.122}
$$

เพื่อให้ง่ายต่อการแสดงการวิเคราะห์จึงได้กำหนดให้สัญญาณอินพุต $v_i(\tau) = A_f\cos(\omega_f\tau)$ เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยที่ A_f และ ω_f คือขนาดและความถี่ของสัญญาณคลื่นรูปไซน์และ เมื่อทำการป้อนอินพุต $v_i(\tau)$ เข้าไปในวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที ซึ่งได้ค่าผลตอบสนองบังคับดังสมการ (3.123)

$$v_{of}(\tau) = A_TA_f\cos(\omega_f\tau + \angle\phi_T(\omega)) \tag{3.123}$$

3.3.2.4 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์



รูปที่ 3.11 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับ

จากการป้อนสัญญาณอินพุตไปที่วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ขาลบของออป-แอมป์ ดังรูปที่ 3.11 เมื่อทำการวิเคราะห์โหนดที่จุดรวม V_x, V_a, V_y และ V_i ใน S - domain ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ถูกป้อนอินพุต จึงได้ความสัมพันธ์เป็นดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (3.124) ,(3.125) และ (3.126) ตามลำดับโดยที่ V_x คือแรงดันที่ขาลบและขาบวกของออป-แอมป์ V_o คือแรงดันที่ขาเอาต์พุตและ V_i คือแรงดันที่ขาอินพุตบังคับ

$$\frac{V_x(s)-V_i(s)}{R}+sC\big(V_x(s)-V_a(s)\big)=0 \tag{3.124}$$

$$sCV_x(s)+\frac{V_x(s)-V_o(s)}{R}=0 \tag{3.125}$$

$$sC\big(V_y(s)-V_o(s)\big)+\frac{V_y(s)-V_a(s)}{R}=0 \tag{3.126}$$

จากสมการ (3.124) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_a ได้ดังสมการ (3.127)

$$V_a(s)=\left(\frac{sRC+1}{sRC}\right)V_x(s)-\left(\frac{1}{sRC}\right)V_i(s) \tag{3.127}$$

จากสมการ (3.125) เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ จึงสามารถแสดงสมการแรงดันรวมที่จุด V_x ได้ดังสมการ (3.128)

$$V_x(s)=\left(\frac{1}{sRC+1}\right)V_o(s) \tag{3.128}$$

เมื่อทำการแทนสมการ (3.127) และ (3.128) ลงในสมการ (3.126) และเนื่องจากค่าแรงดันรวมที่จุด V_y มีค่าเท่ากับศูนย์ จึงทำให้สามารถจัดรูปสมการออกมาได้ใหม่ดังสมการ (3.129)

$$sCV_o(s)+\left(\frac{1}{sR^2C}\right)V_o(s)-\left(\frac{1}{sR^2C}\right)V_i(s)=0 \tag{3.129}$$

เมื่อทำการคูณ sR^2C ตลอดทั้งสมการ (3.129) และทำการจัดรูปสมการใหม่ ซึ่งสามารถหาฟังก์ชั่นส่งผ่านของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ได้ดังสมการ (3.130)

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)}=\left(\frac{1}{s^2R^2C^2+1}\right) \tag{3.130}$$

จากสมการ (3.130) จึงสามารถหาขนาดและเฟสของฟังก์ชั่นส่งผ่าน $V_o(s)/V_i(s)$ สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ได้ดังสมการ (3.131)

$$M(\omega)=A_Q=\sqrt{\left(\frac{1}{(\omega^2R^2C^2-1)}\right)^2} \tag{3.131}$$

$$\angle\phi_Q(\omega)=0$$

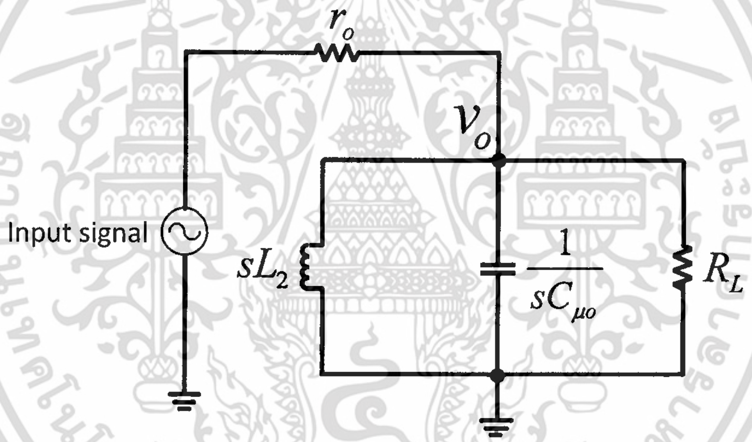
เพื่อให้ง่ายต่อการแสดงการวิเคราะห์จึงได้กำหนดให้สัญญาณอินพุต $v_i(\tau)=A_f\cos(\omega_f\tau)$ เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยที่ A_f และ ω_f คือขนาดและความถี่ของสัญญาณคลื่นรูปไซน์และ เมื่อทำการป้อนอินพุต $v_i(\tau)$ เข้าไปในวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ซึ่งได้ค่าผลตอบสนองบังคับดังสมการ (3.132)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{of}(\tau) = A_Q A_f \cos(\omega_f \tau) \tag{3.132}$$

3.3.2.4 วงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์

เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 3.7 เนื่องจากได้ป้อนอินพุตที่เป็นสัญญาณที่มีความถี่สูง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของ C_π มีค่าน้อยมาก จึงส่งผลให้แรงดันที่ตกคร่อมโหนด V_b และ V_e มีค่าน้อยมากไปด้วย จึงสามารถละทิ้งค่า $g_m v_{be}$ ไปได้ และเมื่อทำการวิเคราะห์ตัวเก็บประจุ C_μ ด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎี Miller's effect ทำให้สามารถแยกตัวเก็บประจุ C_μ ได้เป็น $C_{\mu i}$ และ $C_{\mu o}$ ที่อยู่ติดกับโหนด V_b และโหนด V_c โดย C_3 และ C_4 นั้นทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุคัปปลิ้ง ซึ่งสามารถละทิ้งได้ จึงทำให้โหนดรวมที่จุด $V_i = V_e$ และ $V_o = V_c$ จึงสามารถแสดงรูปวงจรสมมูลในกรณีที่มีการป้อนอินพุตให้กับวงจรได้ใหม่ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองบังคับ

เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรจากรูปที่ 3.12 สามารถหาฟังก์ชั่นส่งผ่าน $V_o(s)/V_i(s)$ ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ได้ดังสมการ (3.133)

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \left(\frac{Z_y}{Z_y + r_o}\right) \tag{3.133}$$

โดยกำหนดให้ค่า Z_y คือการขนานกันระหว่าง $L_2 // C_{\mu o}$ และ R_L ดังนั้นค่าของ Z_y มีค่าเท่ากับ $\left(\frac{sL_2R_L}{s^2C_{\mu o}L_2R_L + sL_2 + R_L}\right)$ เมื่อแทนค่า Z_y ลงในสมการ (3.133) จึงสามารถหาขนาดและเฟสของฟังก์ชั่นส่งผ่าน $V_o(s)/V_i(s)$ ได้ดังสมการ (3.134) และสมการ (3.135) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M(\omega) = A_C = \frac{R_L}{\sqrt{(L_2R_L + L_2r_o)^2 + \left(\frac{R_Lr_o}{\omega}\right)^2}} \cong \frac{R_L}{R_L + r_o} \quad (3.134)$$

$$\angle\phi_C(\omega) = \tan^{-1}\left(\left(\frac{L_2(R_L + r_o)}{R_Lr_o}\right)\omega\right) \quad (3.135)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการแสดงการวิเคราะห์จึงได้กำหนดให้สัญญาณอินพุต $v_i(\tau) = A_f\cos(\omega_f\tau)$ เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยที่ A_f และ ω_f คือขนาดและความถี่ของสัญญาณคลื่นรูปไซน์และ เมื่อทำการป้อนอินพุต $v_i(\tau)$ เข้าไปในวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ซึ่งได้ค่าผลตอบสนองบังคับดังสมการ (3.136)

$$v_{of}(\tau) = A_CA_f\cos(\omega_f\tau + \angle\phi_C(\omega)) \quad (3.136)$$

3.3.3 วิเคราะห์ผลตอบสนองสมบูรณ์

โดยทั่วไปแล้วผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบเป็นการรวมกันของผลตอบสนองธรรมชาติและผลตอบสนองบังคับ โดยอาศัยเทคนิคการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาในการแทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.6.2 ส่งผลให้ขนาดของผลตอบสนองธรรมชาตินั้นเปลี่ยนแปลงไปตามผลตอบสนองบังคับที่ป้อนให้กับระบบ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ได้ เพื่อเป็นการยืนยันถึงการประยุกต์ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่นำมาใช้ในการย้ายย่านความถี่ โดยนำเอาผลตอบสนองธรรมชาติและผลตอบสนองบังคับ ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณในข้างต้นมาแทนในผลตอบสนองสมบูรณ์ที่แบ่งแยกตัวแปรทางเวลาดังสมการ (3.1) ดังนั้นจึงสามารถหาค่าผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำได้ยกตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ เลื่อนเฟส ทวินที และ ควอดราเจอร์ และวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่สูงได้ยกตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ได้ดังต่อไปนี้

เมื่อนำค่าผลตอบสนองบังคับของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกป้อนอินพุตจากสมการ (3.98) ไปแทนเป็นผลตอบสนองบังคับในสมการ (3.1) และทำการจัดรูปสมการใหม่ ซึ่งได้ค่าผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบดังสมการ (3.137)

$$\begin{aligned} v_o(t) = &-\frac{A_wA_f\cos\left((\omega_n - \omega_f)t + \angle\phi_W(\omega)\right)}{2} + X_0\cos(\omega_nt) \\ &-\frac{A_wA_f\cos\left((\omega_n + \omega_f)t + \angle\phi_W(\omega)\right)}{2} + A_wA_f\cos\left(\omega_ft + \angle\phi_W(\omega)\right) \end{aligned} \quad (3.137)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าผลตอบสนองบังคับของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกป้อนอินพุตจากสมการ (3.110) ไปแทนเป็นผลตอบสนองบังคับในสมการ (3.1) และทำการจัดรูปสมการใหม่ซึ่งได้ค่าผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบดังสมการ (3.138)

$$\begin{aligned} v_o(t) = &-\frac{A_p A_f \cos\left(\left(\omega_n - \omega_f\right)t + \angle\phi_P(\omega)\right)}{2} + X_0 \cos\left(\omega_n t\right) \\ &-\frac{A_p A_f \cos\left(\left(\omega_n + \omega_f\right)t + \angle\phi_P(\omega)\right)}{2} + A_p A_f \cos\left(\omega_f t + \angle\phi_P(\omega)\right) \end{aligned} \tag{3.138}$$

เมื่อนำค่าผลตอบสนองบังคับของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ถูกป้อนอินพุตจากสมการ (3.123) ไปแทนเป็นผลตอบสนองบังคับในสมการ (3.1) และทำการจัดรูปสมการใหม่ซึ่งได้ค่าผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบดังสมการ (3.139)

$$\begin{aligned} v_o(t) = &-\frac{A_T A_f \cos\left(\left(\omega_n - \omega_f\right)t + \angle\phi_T(\omega)\right)}{2} + X_0 \cos\left(\omega_n t\right) \\ &-\frac{A_T A_f \cos\left(\left(\omega_n + \omega_f\right)t + \angle\phi_T(\omega)\right)}{2} + A_T A_f \cos\left(\omega_f t + \angle\phi_T(\omega)\right) \end{aligned} \tag{3.139}$$

เมื่อนำค่าผลตอบสนองบังคับของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ถูกป้อนอินพุตจากสมการ (3.131) ไปแทนเป็นผลตอบสนองบังคับในสมการ (3.1) และทำการจัดรูปสมการใหม่ซึ่งได้ค่าผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบดังสมการ (3.140)

$$\begin{aligned} v_o(t) = &-\frac{A_Q A_f \cos\left(\left(\omega_n - \omega_f\right)t\right)}{2} + X_0 \cos\left(\omega_n t\right) \\ &-\frac{A_Q A_f \cos\left(\left(\omega_n + \omega_f\right)t\right)}{2} + A_Q A_f \cos\left(\omega_f t\right) \end{aligned} \tag{3.140}$$

เมื่อนำค่าผลตอบสนองบังคับของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกป้อนอินพุตจากสมการ (3.136) ไปแทนเป็นผลตอบสนองบังคับในสมการ (3.1) และทำการจัดรูปสมการใหม่ซึ่งได้ค่าผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบดังสมการ (3.141)

$$\begin{aligned} v_o(t) = &-\frac{A_C A_f \cos\left(\left(\omega_n - \omega_f\right)t + \angle\phi_C(\omega)\right)}{2} + X_0 \cos\left(\omega_n t\right) \\ &-\frac{A_C A_f \cos\left(\left(\omega_n + \omega_f\right)t + \angle\phi_C(\omega)\right)}{2} + A_C A_f \cos\left(\omega_f t + \angle\phi_C(\omega)\right) \end{aligned} \tag{3.141}$$

จากผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่ได้ทำการวิเคราะห์มาในข้างต้นทั้งในย่านความถี่ต่ำได้ยกตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ เลื่อนเฟส ทวินที และควอดราเจอร์และวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่สูงได้ยกตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ สังเกตได้ว่าพจน์แรกและพจน์ที่สามทางด้านขวาของสมการ (3.137) - (3.141) เป็นพจน์ที่มีความถี่เป็นผลต่างและผลรวมระหว่างความถี่ธรรมชาติและความถี่อินพุตหรือเป็นพจน์ที่ใช้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การย้ายย่านความถี่ลงและย้ายย่านความถี่ขึ้นมานั่นเอง โดยเราสามารถนำวงจรกรองสัญญาณมาเลือกกรองเฉพาะสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่มาใช้งานต่อไปได้ จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจึงเห็นได้ชัดว่าวงจรกำเนิดสัญญาณที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับสองขึ้นไปสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงได้และเพื่อเป็นการยืนยันหลักการและผลการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอมาในข้างต้น โดยลำดับต่อไปจึงได้ทำการทดลองจริงกับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ เลื่อนเฟส ทวินที ควอดราเจอร์และโคลพิตต์แบบประยุกต์ และทำการวัดค่าทดสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

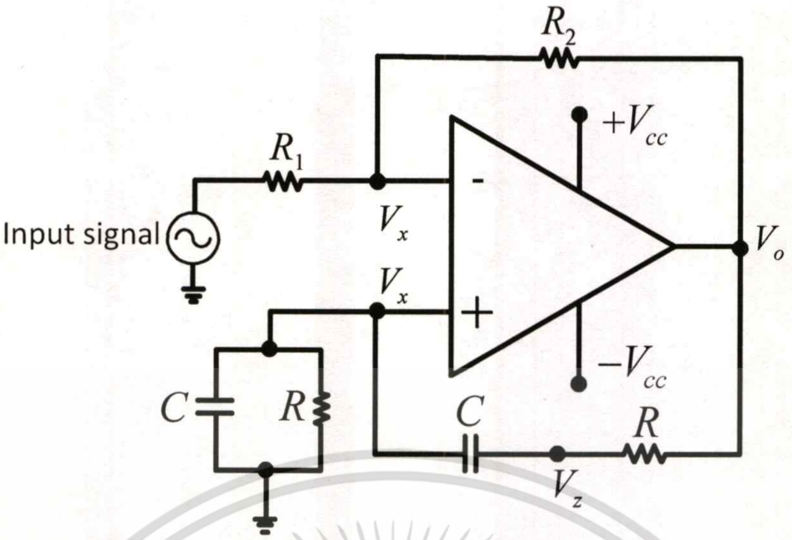
เพื่อเป็นการยืนยันหลักการการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในกรณีที่มีอินพุตบังคับที่เป็นสัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในการย้ายย่านความถี่โดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์แยกตัวแปรทางเวลาตามที่ได้นำเสนอมาในบทที่ 2 และบทที่ 3 จึงได้ทำการทดลองกับวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงและได้แสดงผลการทดลองในบทที่ 4 นี้ โดยสามารถแสดงผลการทดลองที่ได้จากการป้อนอินพุตเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณย่านความถี่ต่ำแบบเวนบริดจ์, เลื่อนเฟส, ทวินที และควอดราเจอร์ เพื่อให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงในหัวข้อ 4.1- 4.4 ตามลำดับ และสามารถแสดงผลการทดลองที่ได้จากการป้อนอินพุตเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์และสัญญาณเอฟเอ็มให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณย่านความถี่สูงโคลพิตต์แบบประยุกต์เพื่อให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงในหัวข้อที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ และสามารถแสดงผลการวัดทดสอบค่าการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์เพื่อใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงในหัวข้อที่ 4.7 โดยในการวัดทดสอบค่าการทำงานได้ใช้การวัดผลดังต่อไปนี้

1. ค่าอัตราขยายแปลงผัน (Conversion Gain)
2. ค่าการลดทอน 1 dB (1 dB Compression)
3. ค่า IIP3 (Third-order Input Intercept Point)
4. ค่า THD (Total Harmonic Distortion)

4.1 ผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์

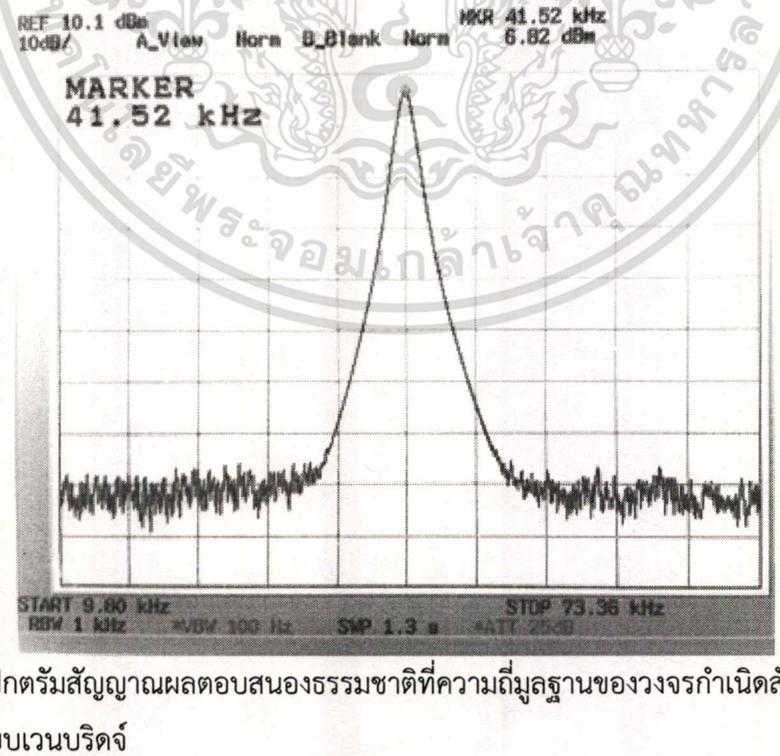
เพื่อเป็นการยืนยันหลักการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2.6.3 และ 3.3 เมื่อทำการทดลองจริงกับวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบเวนบริดจ์ดังรูปที่ 4.1 สำหรับย่านความถี่ 41 KHz โดยที่กำหนดให้ค่าอุปกรณ์เป็นดังนี้ $R_1 = 1k\Omega, R_2 = 30k\Omega, R = 3.9k\Omega, C = 1nF$ และ $V_{cc} = \pm 7V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบเวนบริดจ์ที่ใช้สำหรับย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง

ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ โดยวัดค่าจากเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์โดยนอมอลไลซ์ค่าอิมพีแดนซ์ที่ 50Ω สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานมีความถี่อยู่ที่ 41.52 KHz และมีกำลังของสัญญาณ 6.82 dBm



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามหลักการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณแบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาที่ได้นำเสนอมาในบทที่ 3 ทำให้สามารถแสดงผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ได้จากสมการ (3.137) ซึ่งสามารถแสดงได้ใหม่ดังสมการ (4.1)

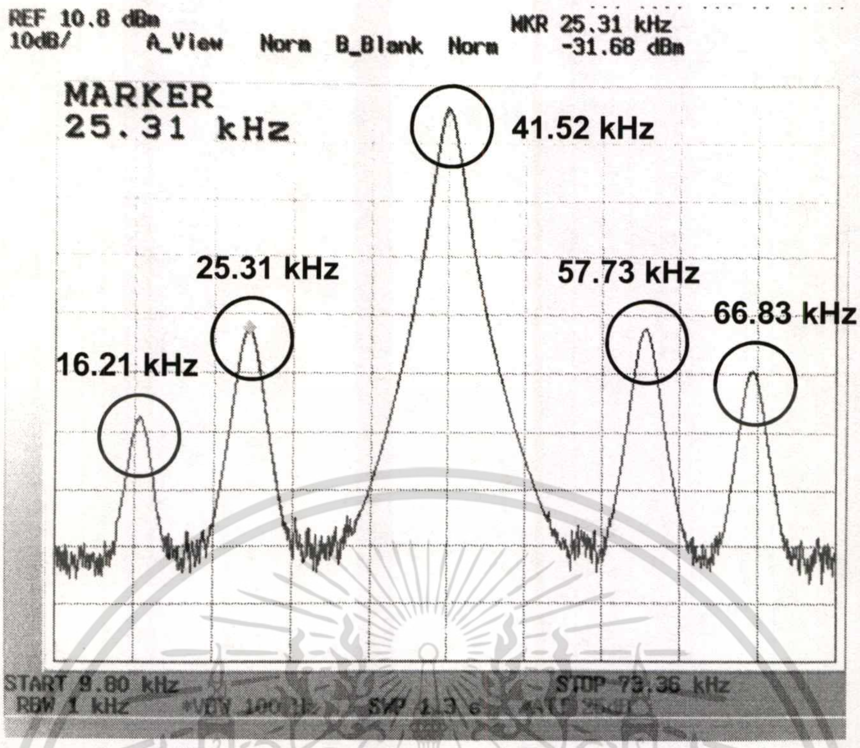
$$v_o(t) = -\frac{A_w A_f \cos\left(\left(\omega_n - \omega_f\right)t + \angle\phi_W(\omega)\right)}{2} + X_0 \cos\left(\omega_n t\right) - \frac{A_w A_f \cos\left(\left(\omega_n + \omega_f\right)t + \angle\phi_W(\omega)\right)}{2} + A_w A_f \cos\left(\omega_f t + \angle\phi_W(\omega)\right) \quad (4.1)$$

เพื่อยืนยันว่าหลักการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์สามารถย้ายย่านความถี่ได้จึงได้ทำการทดลองจริงดังรูปที่ 4.3 โดยได้ทำการป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ขาลบของออปแอมป์และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขาเอาต์พุตของออปแอมป์ซึ่งต่ออยู่กับเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์

รูปที่ 4.3 การทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง

เพื่อความเข้าใจในการอธิบายถึงสเปกตรัมของผลการทดลองที่เกิดขึ้น โดยสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่ความถี่ f_f ไปทำกับสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานที่ผลิตจากวงจรกำเนิดสัญญาณซึ่งมีความถี่ f_n ทำให้เกิดสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นหรือเป็นพจน์ผลบวกระหว่างสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานกับสัญญาณอินพุต $f_n + f_f$ และสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงหรือเป็นพจน์ผลต่างระหว่างสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานกับสัญญาณอินพุต $f_n - f_f$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.1) เมื่อกำหนดให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบมีความถี่เท่ากับ 25.31 KHz และสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ผลิตจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากับ 41.52 KHz จึงทำให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นที่ความถี่ 66.83 KHz และย้ายย่านความถี่ลงที่ความถี่ 16.21 KHz เมื่อทำการทดลองดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ของสเปกตรัมของผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ได้ดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



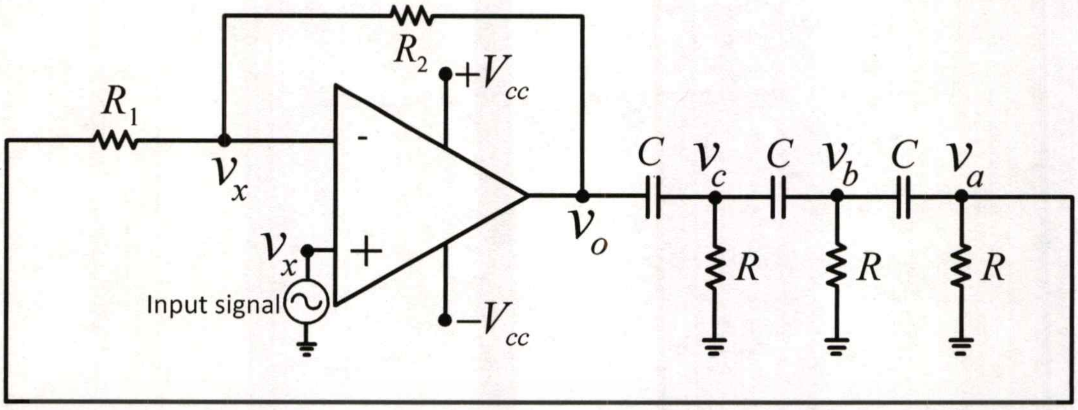
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์

โดยแท่งสเปกตรัมของสัญญาณเรียงจากซ้ายมือของรูปที่ 4.4 ประกอบไปด้วยสเปกตรัมของสัญญาณแท่งแรกคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง $\omega_n - \omega_f$ ความถี่ 16.21 KHz กำลังสัญญาณ -46.60 dBm แท่งที่สองคือสเปกตรัมของสัญญาณของอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ ω_f ความถี่ 25.31 KHz กำลังสัญญาณ -31.68 dBm แท่งที่สามคือสเปกตรัมของสัญญาณความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ ω_n ความถี่อยู่ที่ 41.52 KHz กำลังของสัญญาณ 6.89 dBm แท่งที่สี่คือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงด้วยสเปกตรัมของสัญญาณฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ $2\omega_n - \omega_f$ ความถี่ 57.73 KHz กำลังของสัญญาณ -31.61 dBm และแท่งที่ห้าคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น $\omega_n + \omega_f$ ความถี่ 66.83 KHz กำลังของสัญญาณ -38.77 dBm ตามลำดับ

4.2 ผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์

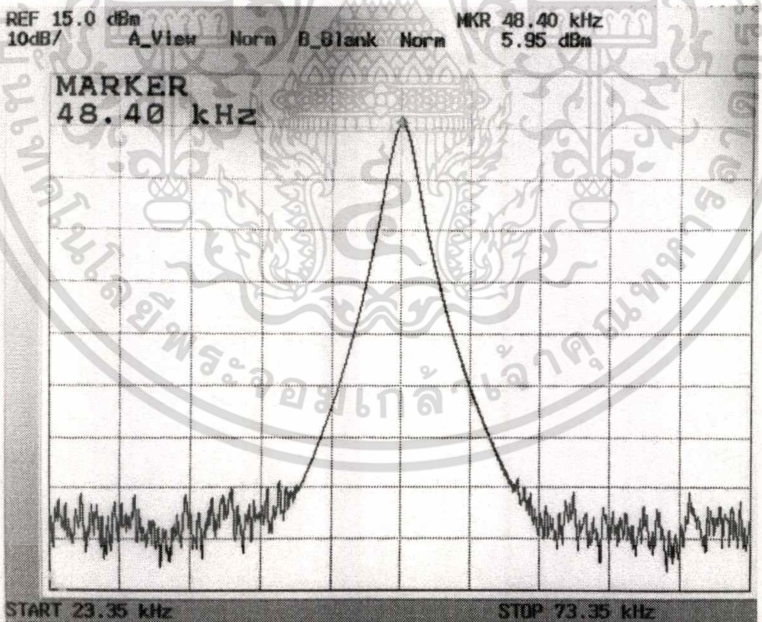
เพื่อเป็นการยืนยันหลักการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2.6.3 และ 3.3 เมื่อทำการทดลองจริงกับวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบเลื่อนเฟสดังรูปที่ 4.5 สำหรับย่านความถี่ 49 KHz โดยที่กำหนดให้ค่าอุปกรณ์เป็น $R = 1.3k\Omega$, $R_1 = 2\ k\Omega$, $R_2 = 33\ k\Omega$, $C = 1\ nF$ และ $V_{cc} = \pm 7V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบเลื่อนเฟสที่ใช้สำหรับย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง

ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส โดยวัดค่าจากเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์โดยนอมอลไลซ์ค่าอิมพีแดนซ์ที่ $50\,\Omega$ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานมีความถี่อยู่ที่ 48.40 KHz และมีกำลังของสัญญาณ 5.95 dBm



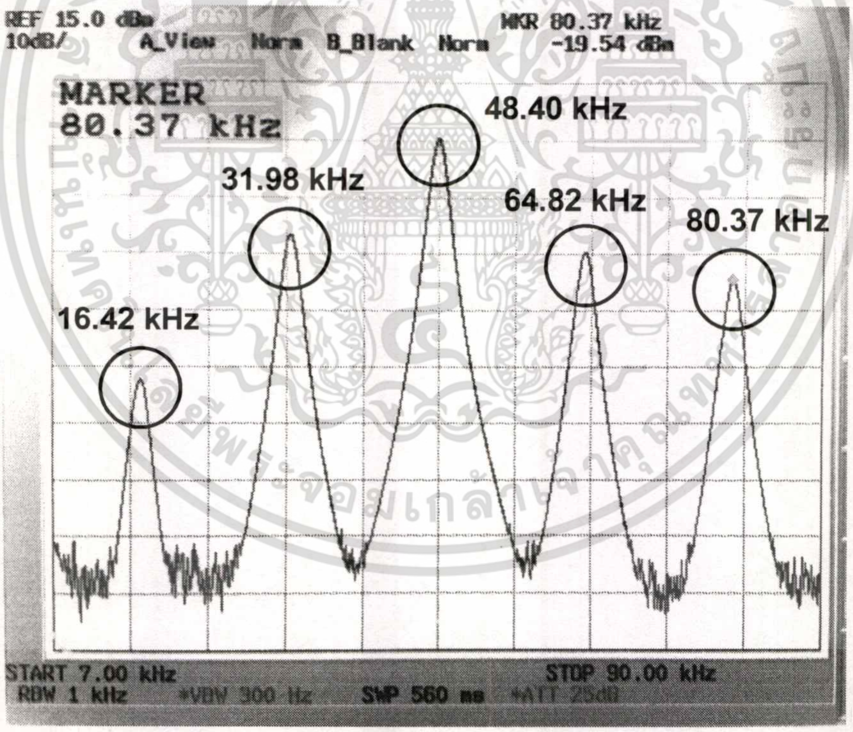
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส

ตามหลักการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณแบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาที่ได้นำเสนอมาในบทที่ 3 ทำให้สามารถแสดงผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสได้จากสมการ (3.138) ซึ่งสามารถแสดงได้ใหม่ดังสมการ (4.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_o(t) = -\frac{A_p A_f \cos\left(\left(\omega_n - \omega_f\right)t + \phi_P(\omega)\right)}{2} + X_0 \cos\left(\omega_n t\right)$$
$$-\frac{A_p A_f \cos\left(\left(\omega_n + \omega_f\right)t + \phi_P(\omega)\right)}{2} + A_p A_f \cos\left(\omega_f t + \phi_P(\omega)\right) \quad (4.2)$$

เพื่อยืนยันว่าหลักการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสสามารถย้ายย่านความถี่ได้จึงได้ทำการทดลองจริงดังรูปที่ 4.3 โดยได้ทำการป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ขาบวกของออปแอมป์และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขาเอาต์พุตของออปแอมป์ซึ่งต่ออยู่กับเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์ จากสมการที่ (4.2) เมื่อกำหนดให้อินพุตที่ป้อนให้กับระบบเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์มีความถี่เท่ากับ 31.98 KHz และสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ผลิตจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากับ 48.40 KHz จึงทำให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นที่ความถี่ 80.37 KHz และย้ายย่านความถี่ลงที่ความถี่ 16.42 KHz ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองของผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส

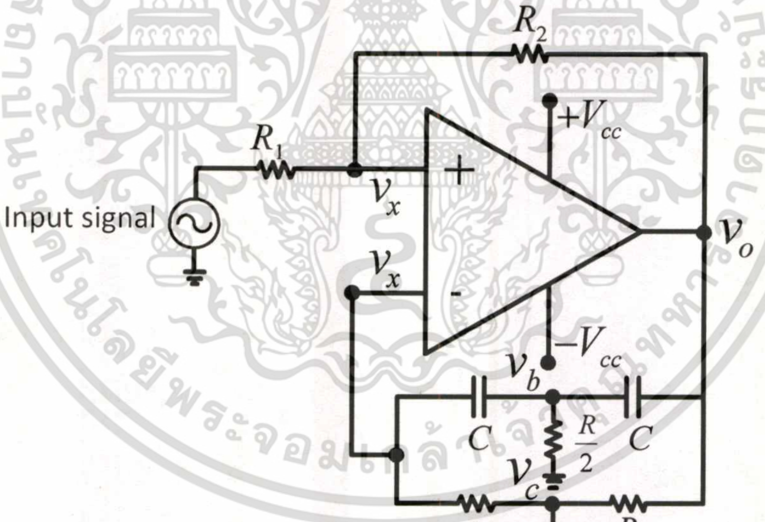
โดยแท่งสเปกตรัมของสัญญาณเรียงจากซ้ายมือของรูปที่ 4.7 ประกอบไปด้วยสเปกตรัมของสัญญาณแท่งแรกคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง $\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 16.42 KHz มีกำลังของสัญญาณ -37.23 dBm แท่งที่สองคือสเปกตรัมของสัญญาณของอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส ω_f ความถี่เท่ากับ 31.98 KHz มีกำลังของสัญญาณ -11.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dBm แท่งที่สามคือสเปกตรัมของสัญญาณความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส ω_n ความถี่เท่ากับ 48.40 KHz มีกำลังของสัญญาณ 5.44 dBm แท่งที่สี่คือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงด้วยสเปกตรัมของสัญญาณฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส $2\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 64.82 KHz มีกำลังของสัญญาณ -14.60 dBm และแท่งที่ห้าคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น $\omega_n + \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 80.37 KHz มีกำลังของสัญญาณ -19.54 dBm ตามลำดับ

4.3 ผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์

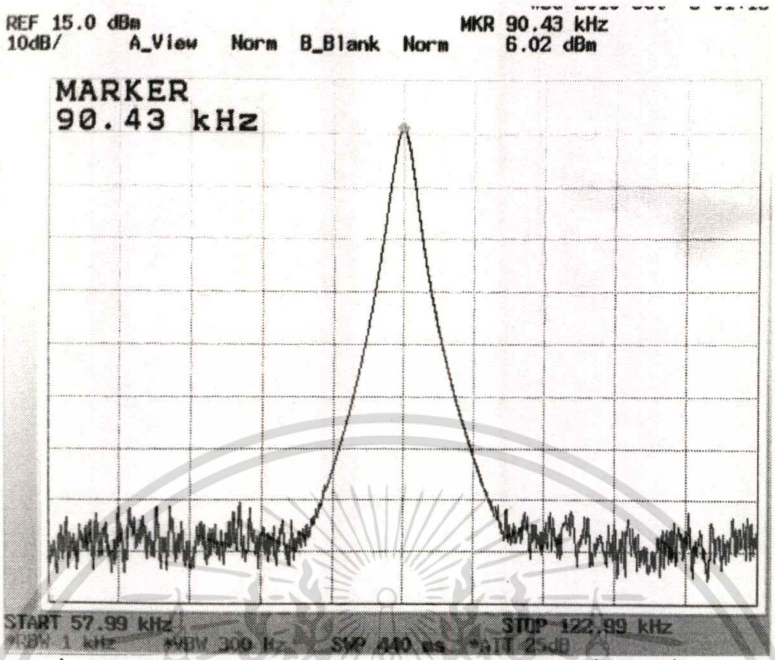
เพื่อเป็นการยืนยันหลักการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2.6.3 และ 3.3 เมื่อทำการทดลองจริงกับวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบทวินทีดังรูปที่ 4.8 สำหรับย่านความถี่ 90 KHz โดยที่กำหนดให้ค่าอุปกรณ์เป็น $R_1 = 1\ k\Omega$, $R_2 = 50\ k\Omega$, $R = 1.8k\Omega$, $C = 1\ nF$ และ $V_{cc} = \pm 7V$



รูปที่ 4.8 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบทวินทีที่ใช้สำหรับย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง

ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที โดยวัดค่าจากเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์โดยนอมอลไลซ์ค่าอิมพีแดนซ์ที่ $50\,\Omega$ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานมีความถี่อยู่ที่ 90.43 KHz และมีกำลังของสัญญาณ 6.02 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



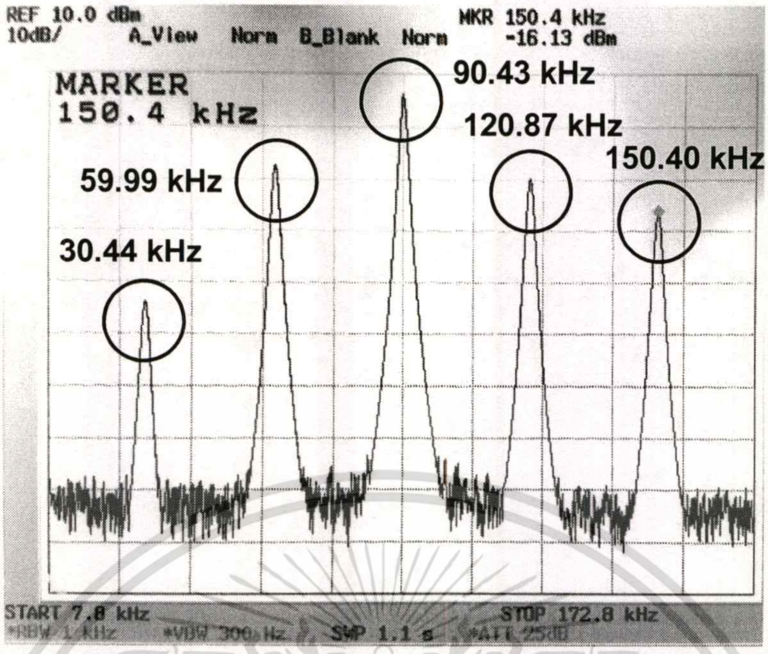
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐาน
ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที

ตามหลักการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณแบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาที่ได้นำเสนอมาในบทที่ 3 ทำให้สามารถแสดงผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีได้จากสมการ (3.139) ซึ่งสามารถแสดงได้ใหม่ดังสมการ (4.3)

$$
\begin{aligned}
v_o(t) = & -\frac{A_T A_f \cos\left(\left(\omega_n - \omega_f\right)t + \phi_T(\omega)\right)}{2} + X_0 \cos\left(\omega_n t\right) \\
& -\frac{A_T A_f \cos\left(\left(\omega_n + \omega_f\right)t + \phi_T(\omega)\right)}{2} + A_T A_f \cos\left(\omega_f t + \phi_T(\omega)\right)
\end{aligned} \tag{4.3}
$$

เพื่อยืนยันว่าหลักการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีสามารถย้ายย่านความถี่ได้จึงได้ทำการทดลองจริงดังรูปที่ 4.3 โดยได้ทำการป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ขาบวกของออปแอมป์และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขาเอาต์พุตของออปแอมป์ซึ่งต่ออยู่กับเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์ จากสมการที่ (4.3) เมื่อกำหนดให้อินพุตที่ป้อนให้กับระบบเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์มีความถี่เท่ากับ 59.99 KHz และสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ผลิตจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากับ 90.43 KHz จึงทำให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นที่ความถี่ 150.40 KHz และย้ายย่านความถี่ลงที่ความถี่ 30.44 KHz ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองของผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีได้ดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



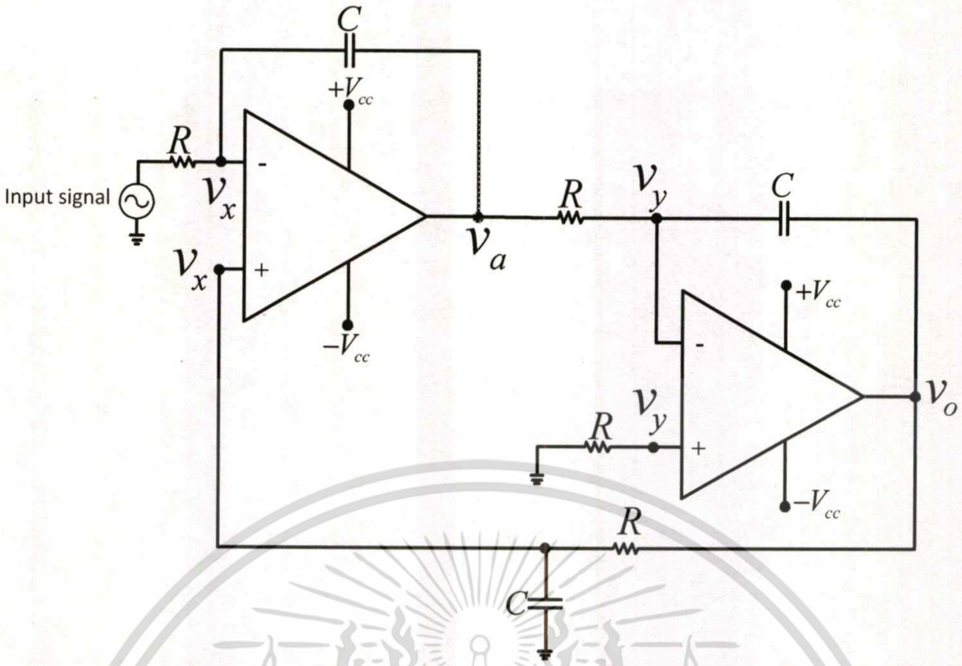
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที

โดยแท่งสเปกตรัมของสัญญาณนับจากซ้ายมือของรูปที่ 4.10 ประกอบไปด้วยสเปกตรัมของสัญญาณแท่งแรกคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง $\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 30.44 KHz มีกำลังของสัญญาณ -33.84 dBm แท่งที่สองคือสเปกตรัมของสัญญาณของอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที ω_f ความถี่เท่ากับ 59.99 KHz มีกำลังของสัญญาณ -7.46 dBm แท่งที่สามคือสเปกตรัมของสัญญาณความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที ω_n ความถี่เท่ากับ 90.43 KHz มีกำลังของสัญญาณ 6.14 dBm แท่งที่สี่คือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงด้วยสเปกตรัมของสัญญาณฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินที $2\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 120.87 KHz มีกำลังของสัญญาณ -9.85 dBm และแท่งที่ห้าคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น $\omega_n + \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 150.40 KHz มีกำลังของสัญญาณ -16.13 dBm ตามลำดับ

4.4 ผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอตดราเจอร์ในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์

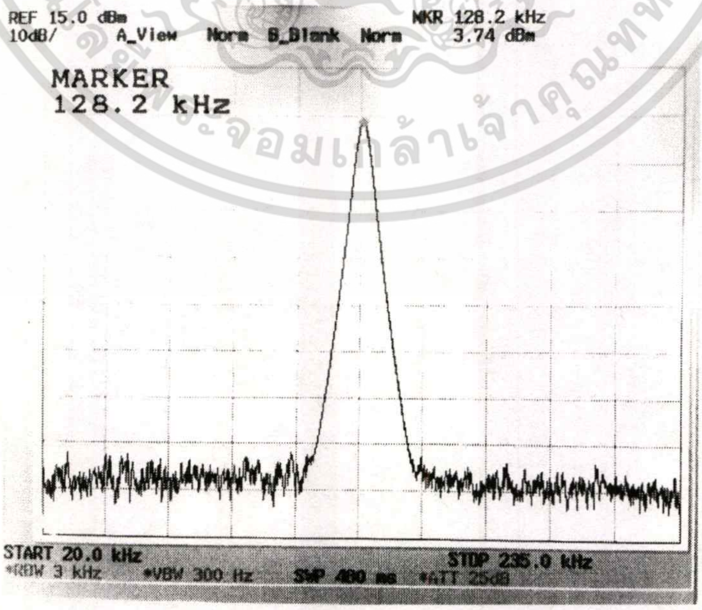
เพื่อเป็นการยืนยันหลักการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2.6.3 และ 3.3 เมื่อทำการทดลองจริงกับวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบควอดราเจอร์ดังรูปที่ 4.11 สำหรับย่านความถี่ 128 KHz โดยที่กำหนดให้ค่าอุปกรณ์เป็น $R = 1.3k\Omega$, $R_1 = 100\ k\Omega$, $C = 1\ nF$ และ $V_{cc} = \pm 7V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบควอดราเจอร์ที่ใช้สำหรับย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง

ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ โดยวัดค่าจากเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์โดยนอมอลไลซ์ค่าอิมพีแดนซ์ที่ $50\,\Omega$ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานมีความถี่อยู่ที่ 128.2 KHz และมีกำลังของสัญญาณ 3.74 dBm



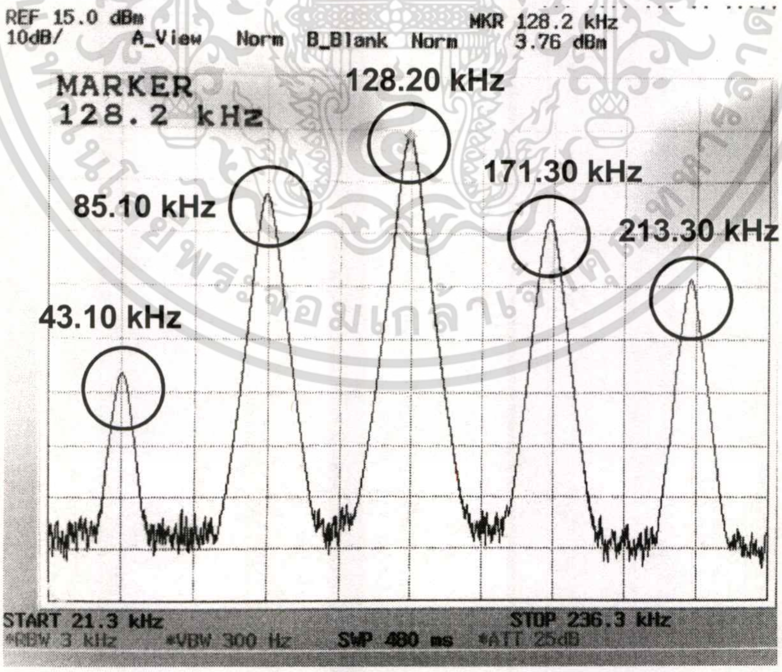
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามหลักการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณแบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาที่ได้นำเสนอมาในบทที่ 3 ทำให้สามารถแสดงผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ได้จากสมการ (3.140) ซึ่งสามารถแสดงได้ใหม่ดังสมการ (4.4)

$$v_o(t,\tau) = -\frac{A_Q A_f \cos\left(\left(\omega_n - \omega_f\right)t\right)}{2} + X_0 \cos\left(\omega_n t\right) - \frac{A_Q A_f \cos\left(\left(\omega_n + \omega_f\right)t\right)}{2} + A_Q A_f \cos\left(\omega_f t\right) \quad (4.4)$$

เพื่อยืนยันว่าหลักการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีสามารถย้ายย่านความถี่ได้จึงได้ทำการทดลองจริงดังรูปที่ 4.3 โดยได้ทำการป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ขาลบของออปแอมป์และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขาเอาต์พุตของออปแอมป์ซึ่งต่ออยู่กับเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์ จากสมการที่ (4.4) เมื่อกำหนดให้อินพุตที่ป้อนให้กับระบบเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์มีความถี่เท่ากับ 85.10 KHz และสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ผลิตจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากับ 128.20 KHz จึงทำให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นที่ความถี่ 213.30 KHz และย้ายย่านความถี่ลงที่ความถี่ 43.10 KHz ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองของผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์

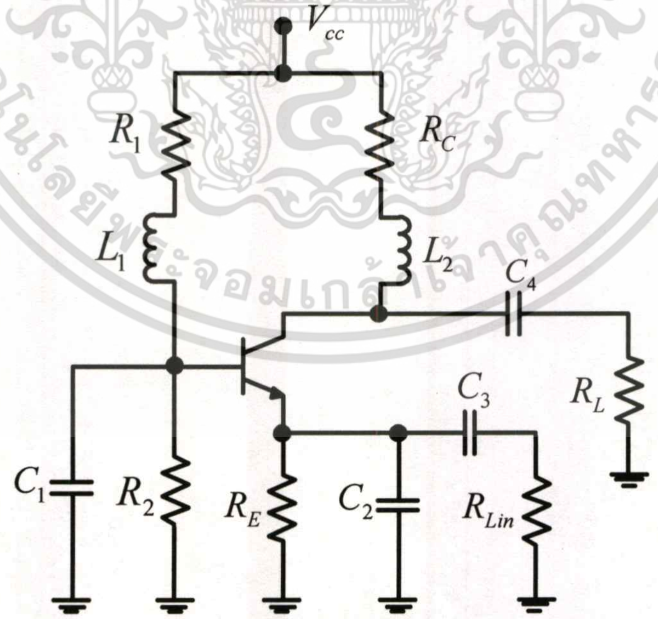
โดยแท่งสเปกตรัมของสัญญาณเรียงจากซ้ายมือของรูปที่ 4.13 ประกอบไปด้วยสเปกตรัมของสัญญาณแท่งแรกคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง $\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 43.10

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KHz มีกำลังของสัญญาณ -41.50 dBm แห่งที่สองคือสเปกตรัมของสัญญาณของอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ ω_f ความถี่เท่ากับ 85.10 KHz มีกำลังของสัญญาณ -7.64 dBm แห่งที่สามคือสเปกตรัมของสัญญาณความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ ω_n ความถี่เท่ากับ 128.20 KHz มีกำลังของสัญญาณ 3.76 dBm แห่งที่สี่คือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงด้วยสเปกตรัมของสัญญาณฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ $2\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 171.30 KHz มีกำลังของสัญญาณ -12.09 dBm และแห่งที่ห้าคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น $\omega_n + \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 213.30 KHz มีกำลังของสัญญาณ -23.66 dBm ตามลำดับ

4.5 ผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์

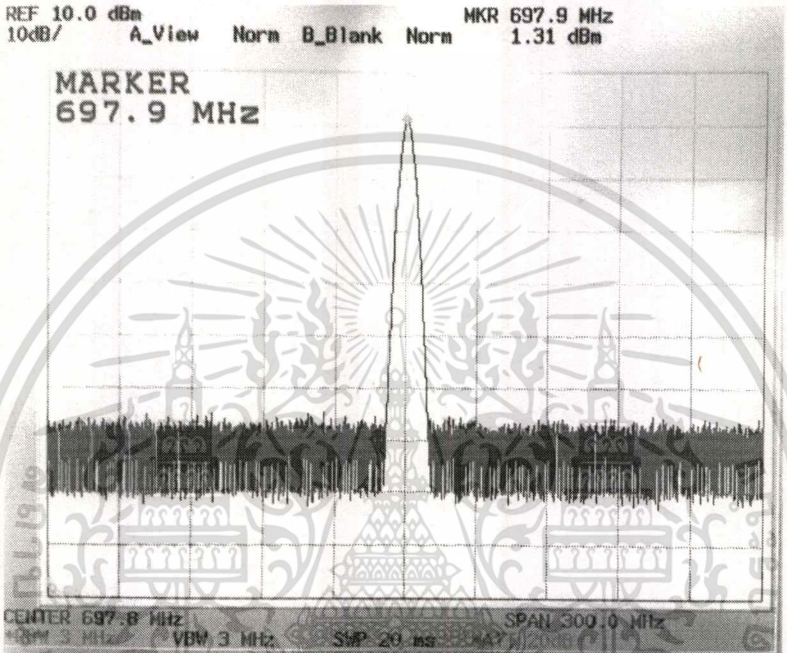
เพื่อเป็นการยืนยันหลักการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2.6.3 และ 3.3 เมื่อทำการทดลองจริงกับวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์โคลพิตต์แบบประยุกต์ดังรูปที่ 4.13 สำหรับย่านความถี่ 700 MHz โดยที่กำหนดให้ค่าอุปกรณ์เป็น $R_1 = 5.6\ k\Omega$, $R_2 = 1.2\ k\Omega$, $R_C = 100\ \Omega$, $R_E = 300\ \Omega$, $C_1 = 470\ nF$, $C_2 = 3\ pF$, $C_3 = 5\ pF$, $C_4 = 10\ \mu F$, $L_1 = 12\ nH$, $L_2 = 12\ nH$, $V_{cc} = 12V$.



รูปที่ 4.14 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์โคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ใช้สำหรับย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ โดยวัดค่าจากเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์โดยนอมอลไลซ์ค่าอิมพีแดนซ์ที่ 50Ω ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานมีความถี่อยู่ที่ 697.9 MHz และมีกำลังของสัญญาณ 1.31 dBm



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์

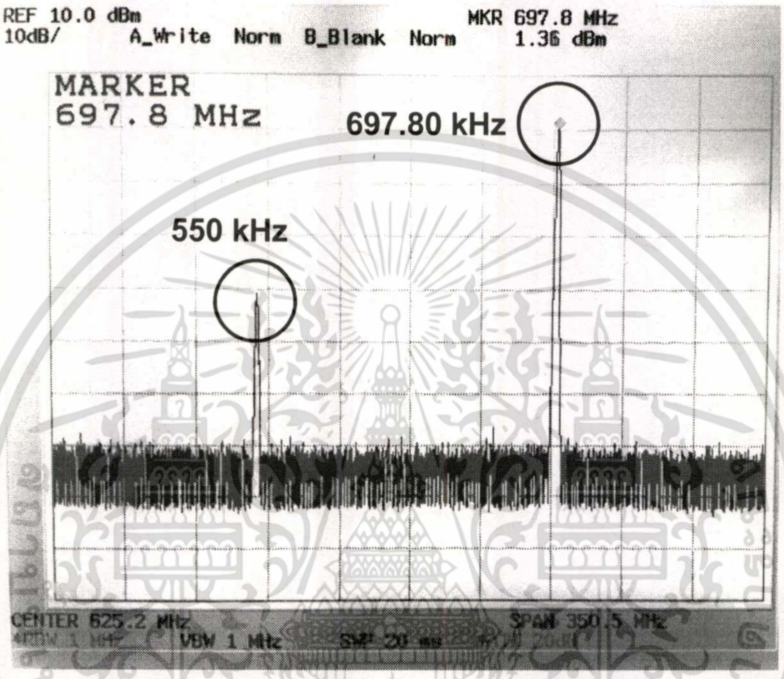
ตามหลักการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณแบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาที่ได้นำเสนอมาในบทที่ 3 ทำให้สามารถแสดงผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ได้จากสมการ (3.141) ซึ่งสามารถแสดงได้ใหม่ดังสมการ (4.5)

$$
\begin{aligned}
v_o(t) = &-\frac{A_C A_f \cos\left(\left(\omega_n - \omega_f\right)t + \phi_C(\omega)\right)}{2} + X_0 \cos\left(\omega_n t\right) \\
&-\frac{A_C A_f \cos\left(\left(\omega_n + \omega_f\right)t + \phi_C(\omega)\right)}{2} + A_C A_f \cos\left(\omega_f t + \phi_C(\omega)\right)
\end{aligned}
\tag{4.5}
$$

เพื่อยืนยันว่าหลักการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์สามารถย้ายย่านความถี่ได้จึงได้ทำการทดลองจริงดังรูปที่ 4.3 โดยได้ทำการป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ซึ่งต่ออยู่กับเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์ จากสมการที่ (4.5) เมื่อกำหนดให้อินพุตที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

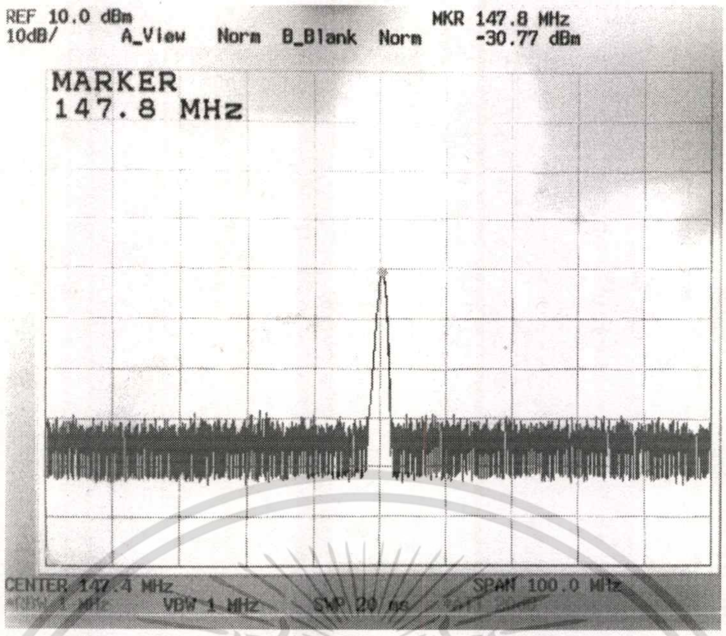
ป้อนให้กับระบบเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์มีความถี่เท่ากับ 697.80 MHz และสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ผลิตจากวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากับ 550 MHz จึงทำให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นที่ความถี่ 1.2479 GHz และย้ายย่านความถี่ลงที่ความถี่ 147.80 MHz ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองของผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ได้ดังรูปที่ 4.16 – 4.18



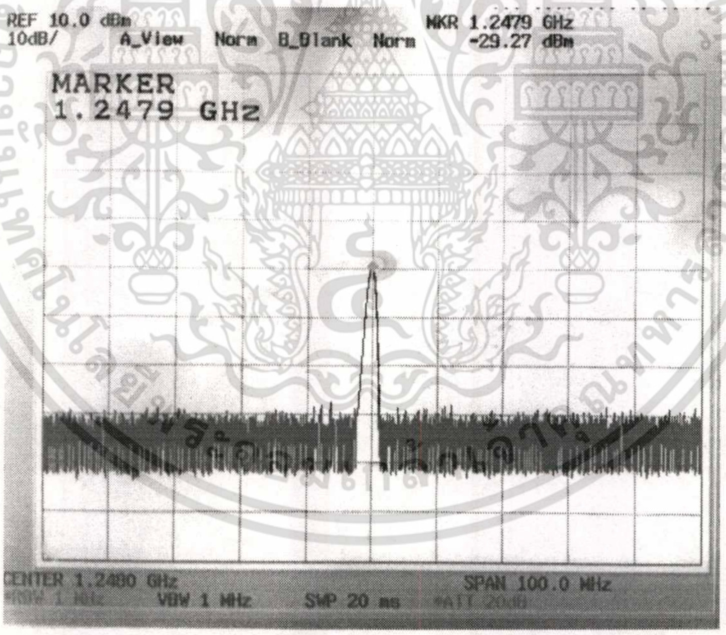
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์

โดยแท่งสเปกตรัมของสัญญาณเรียงจากซ้ายมือของรูปที่ 4.16 ประกอบไปด้วยสเปกตรัมของสัญญาณแท่งแรกคือสเปกตรัมของสัญญาณของอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ ω_f ความถี่เท่ากับ 550 MHz มีกำลังของสัญญาณ -29.36 dBm แท่งที่สองคือสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ ω_n ความถี่เท่ากับ 697.80 MHz มีกำลังของสัญญาณ 1.36 dBm ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อทำการป้อนอินพุตให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณจึงทำให้เกิดการย้ายย่านความถี่ลงหรือพจน์ผลต่างระหว่างสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานกับสัญญาณอินพุต $\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 147.80 MHz มีกำลังของสัญญาณ -30.77 dBm ดังรูป 4.17 และทำให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นหรือพจน์ผลบวกระหว่างสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานกับสัญญาณอินพุต $\omega_n + \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 1.2479 GHz มีกำลังของสัญญาณ -29.27 dBm ดังรูปที่ 4.18 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง



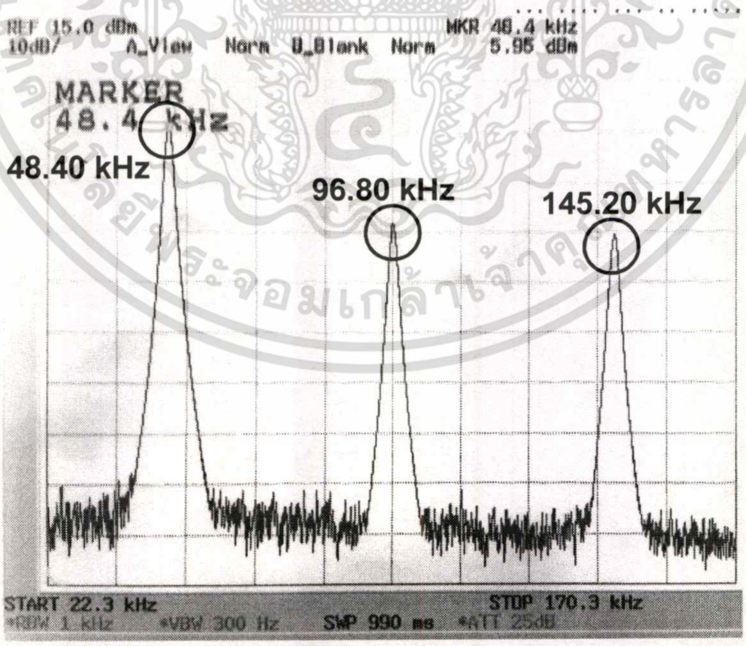
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น

เนื่องจากการทดลองในหัวข้อ 4.1 – 4.5 พบว่ามีสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงด้วยสเปกตรัมของสัญญาณฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณ $2\omega_n - \omega_f$ เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อทำการขยาย (span) ความถี่ของเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์เพิ่มมากขึ้นพบว่าสเปกตรัมของสัญญาณความถี่จากวงจรกำเนิดสัญญาณนั้นไม่เป็นดังอุดมคติเนื่องด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณของสเปกตรัมเอาต์พุตที่ได้เมื่อยังไม่มีการป้อนอินพุตให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณนั้นมีจำนวนสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติมากกว่าหนึ่งความถี่หรือเรียกได้ว่ามีหลายซุเปอร์ฮาร์โมนิค (ω_n, $2\omega_n$, $3\omega_n$, ... , $n\omega_n$) ดังนั้นเมื่อทำการป้อนอินพุต ω_f ให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณทำให้สเปกตรัมของสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบนั้นมีผลกับทุกๆซุเปอร์ฮาร์โมนิคของสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติ ($\omega_n \pm \omega_f$, $2\omega_n \pm \omega_f$, $3\omega_n \pm \omega_f$, ... , $n\omega_n \pm \omega_f$) ซึ่งทำให้เกิดการย้ายย่านความถี่ของสเปกตรัมสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติทุกๆความถี่หรือทุกซุเปอร์ฮาร์โมนิคด้วย ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจในปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจึงขอยกตัวอย่างผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสและวงจรกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิต์ ตามลำดับ

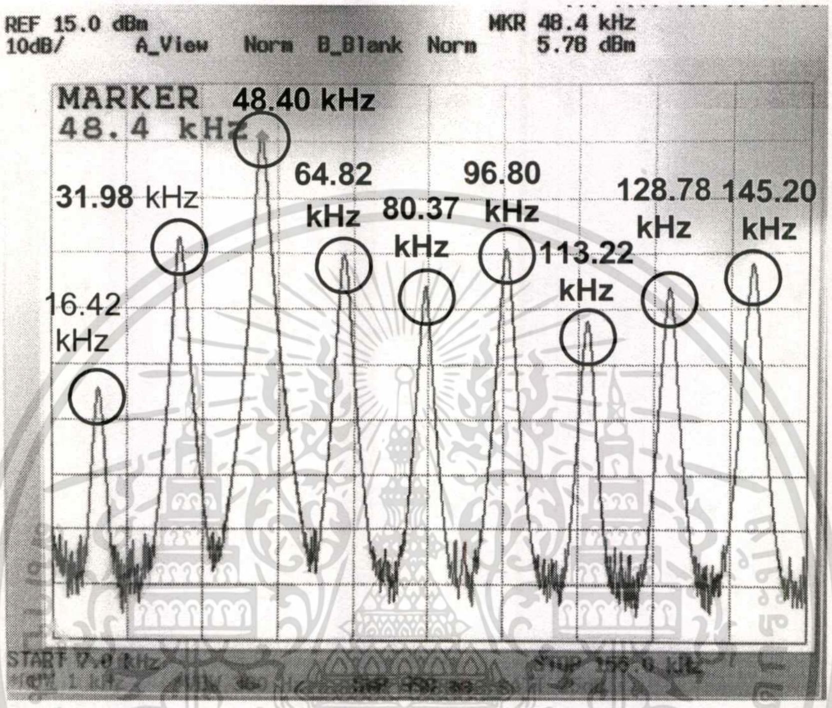
จากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสดังรูปที่ 4.5 สำหรับกรณีที่ไม่มีการป้อนอินพุตให้กับระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 โดยที่สเปกตรัมด้านซ้ายมือคือสเปกตรัมของสัญญาณความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส ω_n ความถี่เท่ากับ 48.40 KHz สเปกตรัมตรงกลางคือสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส $2\omega_n$ ความถี่เท่ากับ 96.80 KHz และสเปกตรัมด้านขวาคือสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สามของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส $3\omega_n$ ความถี่เท่ากับ 145.20 KHz



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสทั้งสามฮาร์โมนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการป้อนอินพุตที่เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส โดยกำหนดให้อินพุตที่ป้อนให้กับระบบมีความถี่อยู่ที่ 31.98 KHz จึงทำให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงสำหรับทุกๆฮาร์โมนิค โดยสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสดังรูปที่ 4.24



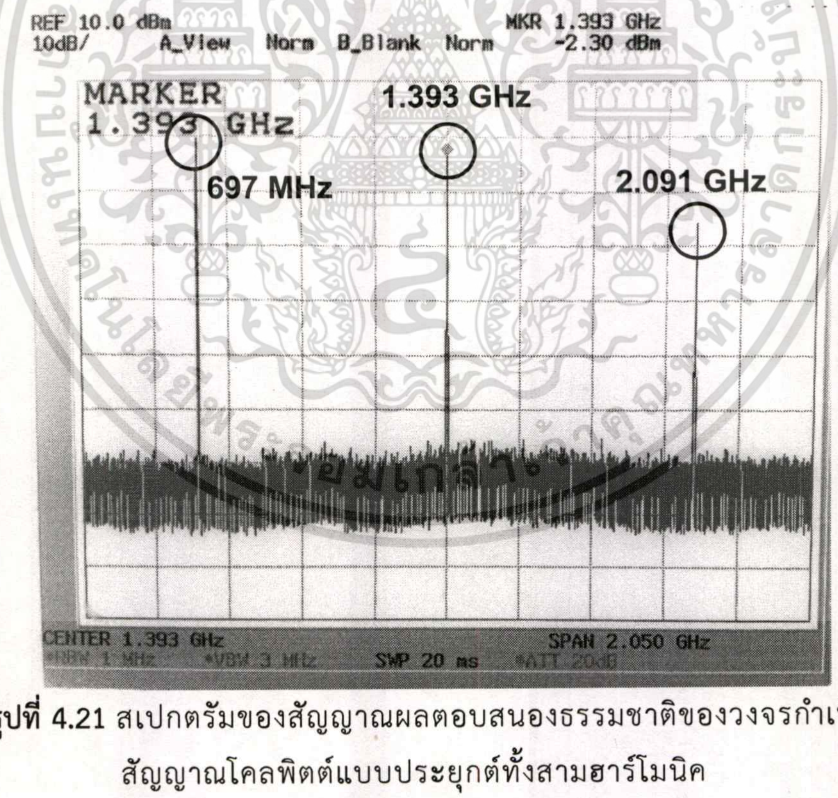
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสทั้งสามฮาร์โมนิค

โดยแท่งสเปกตรัมของสัญญาณเรียงจากซ้ายมือของรูปที่ 4.24 ซึ่งประกอบไปด้วยสเปกตรัมแท่งแรกทางซ้ายมือคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง $\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 16.42 KHz แท่งที่สองคือสเปกตรัมของสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส ω_f ความถี่เท่ากับ 31.98 KHz แท่งที่สามคือสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส ω_n ความถี่เท่ากับ 48.40 KHz แท่งที่สี่คือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงด้วยสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส $2\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 64.82 KHz แท่งที่ห้าคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น $\omega_n + \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 80.37 KHz แท่งที่หกคือสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส $2\omega_n$ ความถี่เท่ากับ 96.80 KHz แท่งที่เจ็ดคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงด้วยสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สามของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส $3\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 113.22 KHz แท่งที่แปดคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นด้วยสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส $2\omega_n + \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 128.78 KHz และแท่งที่เก้าคือสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สามของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟส $3\omega_n$ ความถี่เท่ากับ 145.20 KHz ตามลำดับ

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ดังรูปที่ 4.14 เมื่อยังไม่มีการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ สามารถแสดงสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ได้ดังรูปที่ 4.24 โดยที่สเปกตรัมด้านซ้ายมือคือสเปกตรัมของสัญญาณความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ ω_n ความถี่เท่ากับ 697 MHz สเปกตรัมตรงกลางคือสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ $2\omega_n$ ความถี่เท่ากับ 1.393 GHz และสเปกตรัมด้านขวาคือสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สามของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ $3\omega_n$ ความถี่เท่ากับ 2.091 GHz

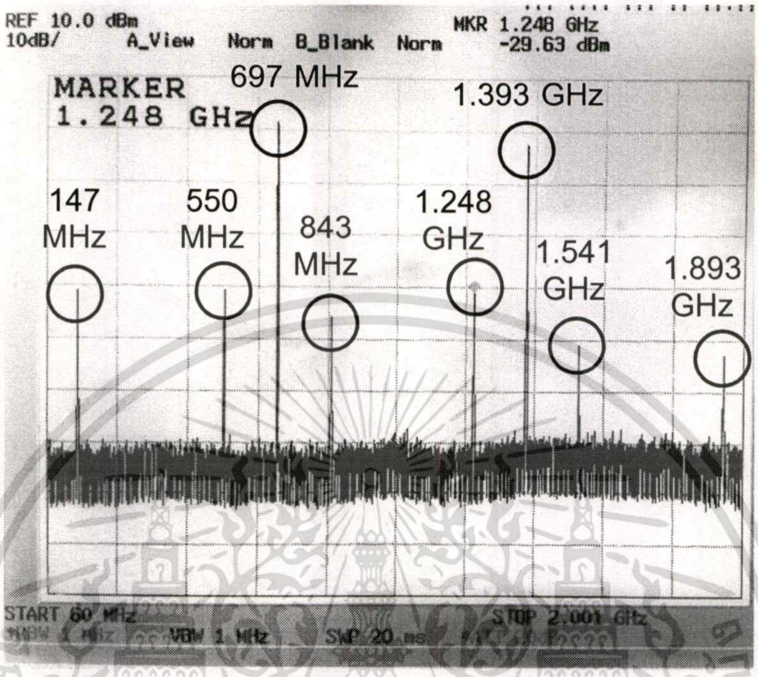


รูปที่ 4.21 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ทั้งสามฮาร์โมนิค

เมื่อทำการป้อนอินพุตที่เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ โดยกำหนดให้อินพุตที่ป้อนให้กับระบบมีความถี่อยู่ที่ 550 MHz จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงทุกๆฮาร์โมนิค โดยสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.22 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ทั้งสามฮาร์โมนิค

ซึ่งประกอบไปด้วยแท่งสเปกตรัมของสัญญาณนับจากซ้ายมือแท่งแรกคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง $\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 147 MHz แท่งที่สองคือสเปกตรัมของสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ ω_f ความถี่เท่ากับ 550 MHz แท่งที่สามคือสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ ω_n ความถี่เท่ากับ 697 MHz แท่งที่สี่คือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงด้วยสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ $2\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 843 MHz แท่งที่ห้าคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น $\omega_n + \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 1.248 GHz แท่งที่หกคือสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ $2\omega_n$ ความถี่เท่ากับ 1.393 GHz แท่งที่เจ็ดคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงด้วยสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สามของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ $3\omega_n - \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 1.541 GHz และแท่งที่แปดคือสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นด้วยสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคที่สองของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ $2\omega_n + \omega_f$ ความถี่เท่ากับ 1.893 GHz ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณเอฟเอ็ม

จากหัวข้อที่ 4.1 – 4.5 ได้ทำการป้อนอินพุตที่เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงได้ ดังนั้นเพื่อยืนยันหลักการที่ได้นำเสนอโดยทำการเปลี่ยนสัญญาณอินพุตจากสัญญาณคลื่นรูปไซน์มาเป็นสัญญาณเอฟเอ็ม ซึ่งสามารถแสดงสมการของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตทางความถี่หรือสัญญาณเอฟเอ็มได้ดังสมการที่ (4.6) โดยที่ k_f คือค่าคงที่ของความเบี่ยงเบนความถี่ชั่วขณะหรือความไวในการมอดูเลตชั่นและ $m(\tau)$ คือข่าวสารของสัญญาณอินพุต

$$\phi_{FM}(t) = A_c \cos\left\{\omega_c t + k_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)d\tau\right\} \tag{4.6}$$

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณเอฟเอ็มให้กับระบบ จึงสามารถแสดงผลตอบสนองบังคับได้ดังสมการ (3.2) โดยที่ $|H(j\omega_c)|$ คือค่าขนาดของระบบและ $\angle H(j\omega_c)$ คือค่าเฟสที่เลื่อนไปของระบบ

$$v_f(\tau) = A_c|H(j\omega_c)|\cos\left\{\omega_c t + k_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)d\tau + \angle H(j\omega_c)\right\} \tag{4.7}$$

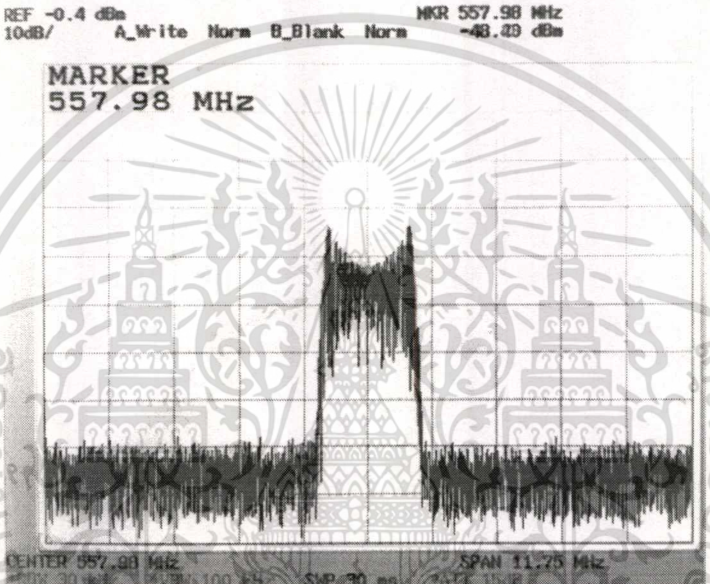
เมื่อนำผลตอบสนองบังคับในสมการ (4.7) มาแทนลงในสมการผลตอบสนองสมบูรณ์ที่ใช้หลักการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา จึงสามารถแสดงสมการผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตบังคับเป็นสัญญาณเอฟเอ็มได้ดังสมการที่ (4.8)

$$\begin{aligned} v_o(t) = &-\frac{A_c|H(\omega)|\cos\left\{(\omega_n-\omega_c)t + k_f \int_{-\infty}^{t} m(t)dt + \angle H(\omega)\right\}}{2} + X_0\cos(\omega_n t) \\ &-\frac{A_c|H(\omega)|\cos\left\{(\omega_n+\omega_c)t + k_f \int_{-\infty}^{t} m(t)dt + \angle H(\omega)\right\}}{2} \\ &+ A_c|H(\omega)|\cos\left\{(\omega_c)t + k_f \int_{-\infty}^{t} m(t)dt + \angle H(\omega)\right\} \end{aligned} \tag{4.8}$$

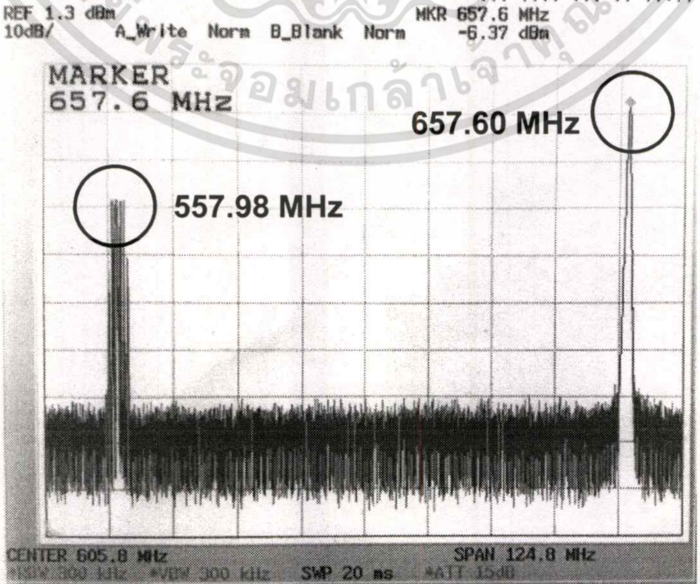
จากสมการ (4.8) เห็นได้ว่าเมื่อป้อนอินพุตบังคับที่เป็นสัญญาณเอฟเอ็มให้กับระบบทำให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นหรือเป็นพจน์ผลบวกระหว่างความถี่ของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติกับสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณเอฟเอ็มและเกิดการย้ายย่านความถี่ลงหรือเป็นพจน์ผลต่างระหว่างความถี่ของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติกับสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณเอฟเอ็ม ดังนั้นเมื่อทำการทดลองจริงดังรูปที่ 4.3 โดยได้ทำการป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณเอฟเอ็มจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูงให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ดังรูปที่ 4.14 ที่ขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์หรือเพื่อประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ซึ่งต่ออยู่กับเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์ เมื่อกำหนดให้อินพุตที่ป้อนให้กับระบบเป็นสัญญาณเอฟเอ็ม ซึ่งผลิตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูงที่ความถี่คลื่นพาห์ 557.98 MHz แบนด์วิดท์ 557.81 ถึง 559.24 MHz หรือมีค่าเท่ากับ 1.43 MHz ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 และเมื่อทำการป้อนอินพุตที่เป็นสัญญาณเอฟเอ็มให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์และกำหนดให้สัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ผลิตจากวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากับ 657.60 MHz ดังรูปที่ 4.20



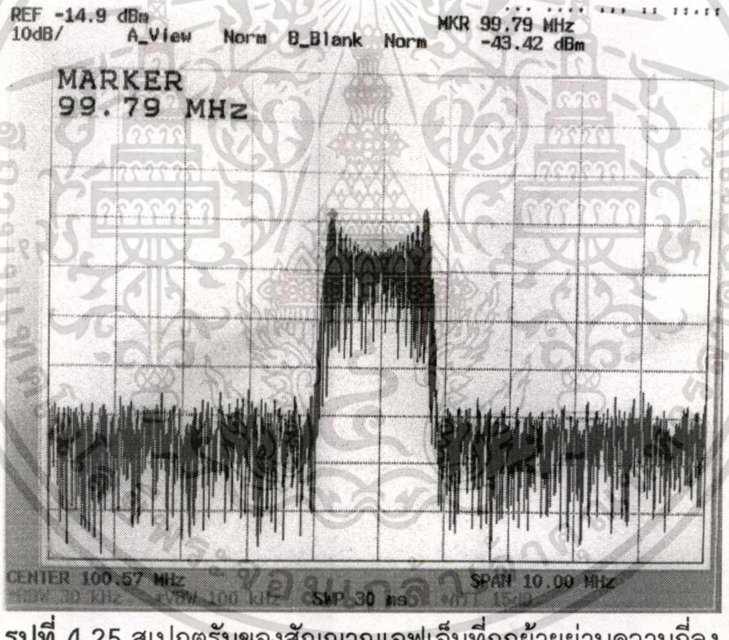
รูปที่ 4.23 สเปกตรัมของสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณเอฟเอ็ม



รูปที่ 4.24 สเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ที่ป้อนอินพุตเป็นสัญญาณเอฟเอ็ม

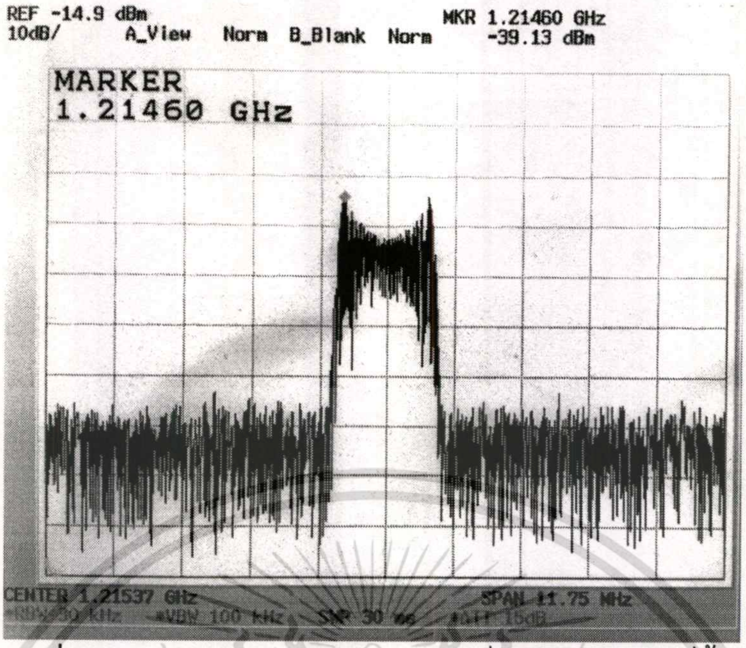
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ได้รับ... เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.20 ประกอบไปด้วยสเปกตรัมของสัญญาณแท่งแรกนับจากซ้ายมือของรูปคือสเปกตรัมของสัญญาณอินพุตบังคับที่เป็นสัญญาณเอฟเอ็มที่ป้อนเข้ามาให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ ω_c ความถี่คลื่นพาห์ 557.98 MHz แบนด์วิดท์ 1.43 MHz และในแท่งที่สองคือสเปกตรัมของสัญญาณความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ ω_n ความถี่เท่ากับ 657.60 MHz ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองของผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์สำหรับการย้ายย่านความถี่ลง $\omega_n - \omega_c$ ที่ความถี่ 99.79 MHz ถึง 101.22 MHz แบนด์วิดท์ 1.43 MHz ดังรูปที่ 4.21 และการย้ายย่านความถี่ขึ้น $\omega_n + \omega_c$ ที่ความถี่ 1.2146 GHz ถึง 1.21603 GHz แบนด์วิดท์ 1.43 MHz ดังรูปที่ 4.22 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบซึ่งเป็นสัญญาณเอฟเอ็มที่มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1.43 MHz เมื่อถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงยังคงมีแบนด์วิดท์เท่าเดิมอยู่



รูปที่ 4.25 สเปกตรัมของสัญญาณเอฟเอ็มที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมของสัญญาณเอฟเอ็มที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น

4.7 ผลการวัดทดสอบค่าการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณในกรณีที่ป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์เพื่อใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง

ในส่วนของผลการวัดทดสอบค่าการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณเพื่อใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง โดยได้ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำแบบเวนบริดจ์, เลื่อนเฟส, ทวินที และ ควอดราเจอร์ สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่สูงได้ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ โดยในการวัดทดสอบค่าการทำงานได้ใช้การวัดผลดังต่อไปนี้

1. ค่าอัตราขยายแปลงผัน (Conversion Gain)
2. ค่าการลดทอน 1 dB (1 dB Compression)
3. ค่า IIP3 (Third-order Input Interception Point)
4. ค่า THD (Total Harmonic Distortion)

4.7.1 การวัดทดสอบค่าอัตราขยายแปลงผัน

ค่าอัตราขยายแปลงผัน (Conversion Gain) คือค่าผลต่างระหว่างกำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกย้ายย่านความถี่กับค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตดังสมการที่ (4.9)

$$CG = P_{output} - P_{input} \tag{4.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดทดสอบค่าอัตราการขยายแปลงผันสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ เลื่อนเฟส ทวินที ควอดราเจอร์และโคลพิตต์ประยุกต์ โดยได้ทำการทดลองดังรูปที่ 4.3 จากผลการทดลองของสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ได้กล่าวมาในข้างต้นในหัวข้อที่ 4.1 - 4.5 เมื่อนำค่ากำลังงานของสัญญาณที่ได้จากการทดลองจริงมาคำนวณดังสมการที่ (4.9) สามารถแสดงค่าอัตราขยายแปลงผันสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ เลื่อนเฟส ทวินที ควอดราเจอร์และโคลพิตต์ประยุกต์ที่ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางผลการวัดทดสอบค่าอัตราขยายแปลงผันสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง

ชนิดของวงจรกำเนิดสัญญาณ	กำลังงานของสัญญาณอินพุต (dBm)	กำลังงานของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น (dBm)	กำลังงานของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง (dBm)	อัตราขยายแปลงผันสำหรับการย้ายย่านความถี่ ขึ้น (dB)	อัตราขยายแปลงผันสำหรับการย้ายย่านความถี่ ลง (dB)
เวนบริดจ์	-31.68	-38.77	-46.60	-7.09	-14.92
เลื่อนเฟส	-11.52	-19.54	-37.23	-8.02	-25.71
ทวินที	-7.46	-16.13	-33.84	-8.67	-26.38
ควอดราเจอร์	-7.64	-23.66	-41.50	-16.02	-33.86
โคลพิตต์ประยุกต์	-29.36	-29.27	-30.77	0.09	-1.41

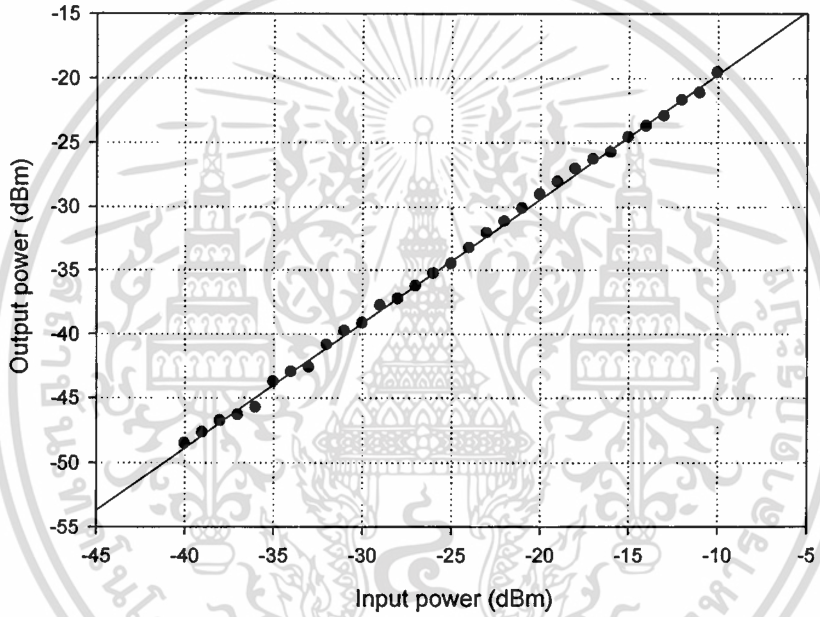
4.7.2 การวัดทดสอบค่าการลดทอน 1 dB

ค่าการลดทอน 1 dB (1 dB Compression) คือค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกย้ายย่านความถี่ให้อัตตราขยายลดลง 1 dB จากค่าการขยายปกติ แม้ว่าจะป้อนอินพุตที่มีค่ากำลังงานเพิ่มขึ้นเท่าใดก็ไม่สามารถขยายได้อีก

๓ โดยการวัดทดสอบค่าการลดทอน 1 dB ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ เลื่อนเฟส ทวินที ควอดราเจอร์และโคลพิตต์ประยุกต์ที่นำมาใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง สามารถทดลองได้ดังรูปที่ 4.3 และทำการวัดผลการทดลองในลักษณะเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.1 – 4.5 โดยทำการเพิ่มค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตทีละ 1 dBm สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งผลิตความถี่มูลฐานเท่ากับ 41.52 KHz กำลังของสัญญาณ 6.89 dBm และ

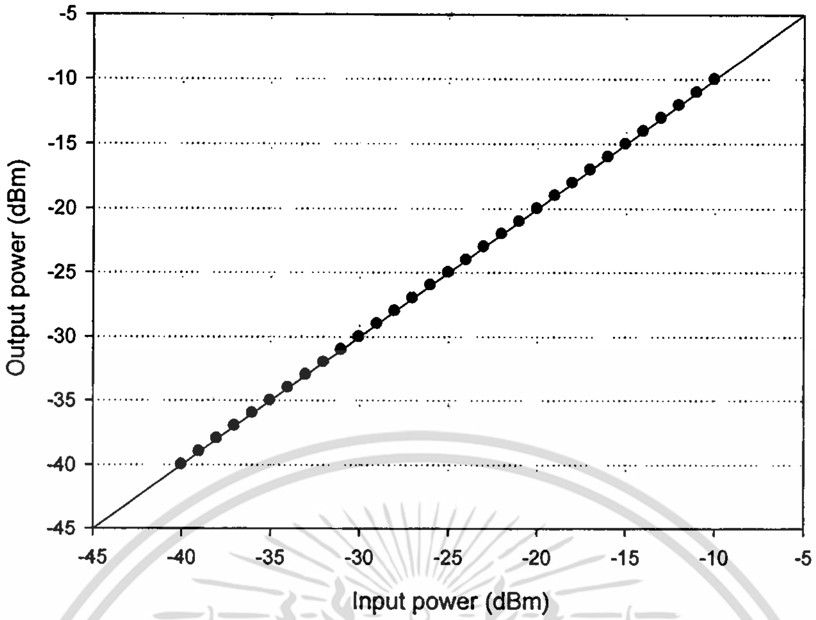
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์มีความถี่เท่ากับ 25.31 KHz โดยทำการปรับระดับกำลังสัญญาณของสัญญาณอินพุตครั้งละ 1 dBm ตั้งแต่ -40 dBm ถึง -10 dBm และทำการวัดค่ากำลังของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง โดยสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นดังรูปที่ 4.26 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับกำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงได้ดังรูปที่ 4.27 ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น

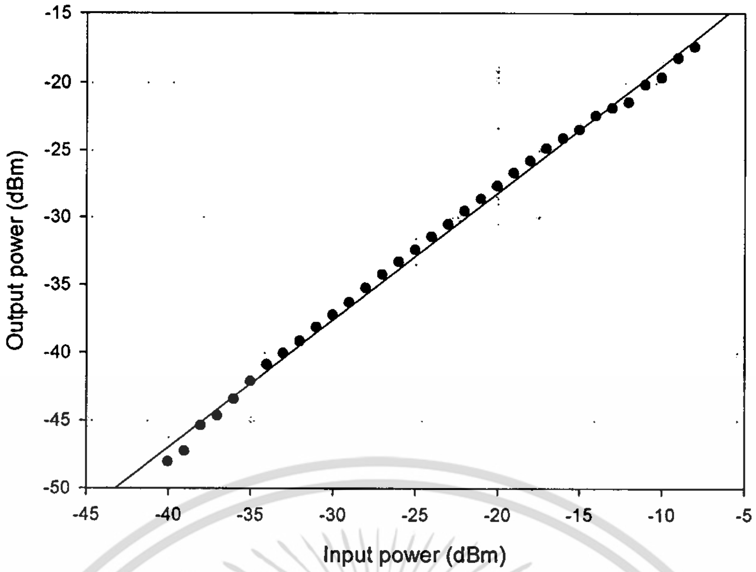
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



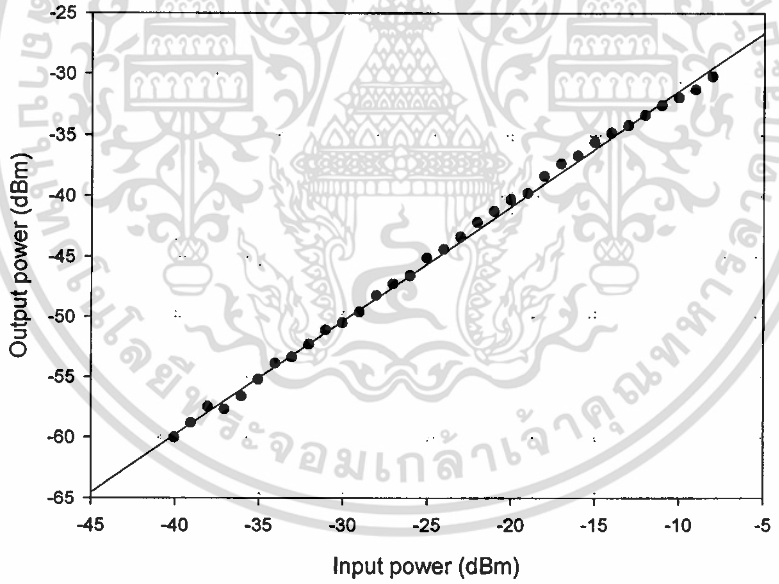
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งผลิตความถี่มูลฐานเท่ากับ 48.40 KHz กำลังของสัญญาณ 5.44 dBm และกำหนดให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสมีความถี่เท่ากับ 31.98 KHz โดยทำการปรับระดับกำลังสัญญาณของสัญญาณอินพุตครั้งละ 1 dBm ตั้งแต่ -40 dBm ถึง -8 dBm และทำการวัดค่ากำลังของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง โดยสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นดังรูปที่ 4.28 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับกำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงได้ดังรูปที่ 4.29 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น

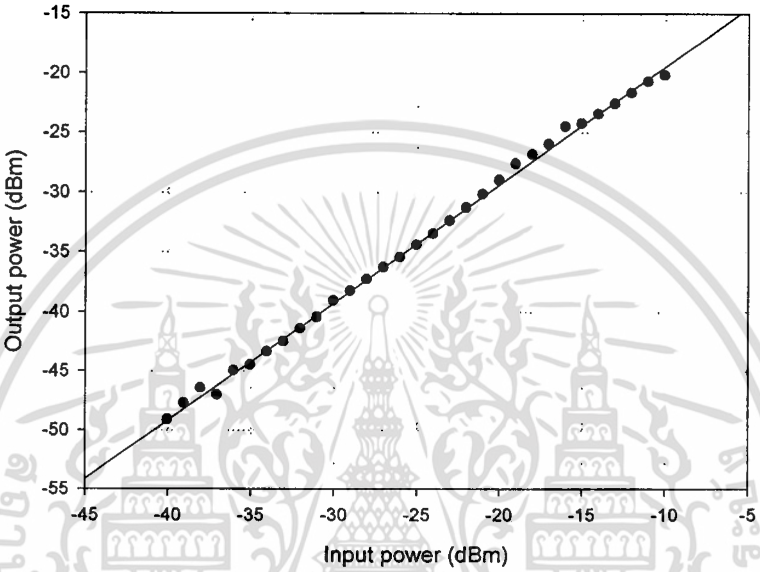


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง

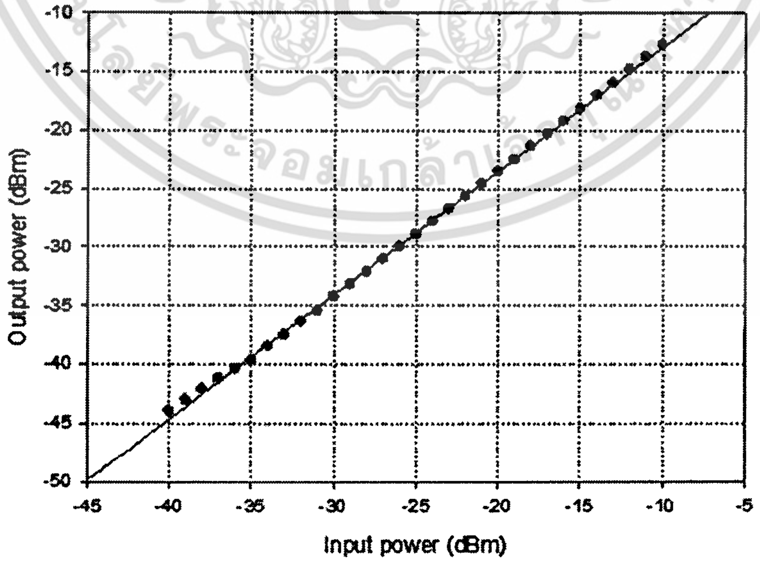
สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งผลิตความถี่มูลฐานเท่ากับ 90.43 KHz กำลังของสัญญาณ 6.14 dBm และกำหนดให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีมีความถี่เท่ากับ 59.99 KHz โดยทำการปรับระดับกำลังสัญญาณของสัญญาณอินพุตครั้งละ 1 dBm ตั้งแต่ -40 dBm ถึง -10 dBm และทำการวัดค่ากำลังของสัญญาณ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาต์พุตที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง โดยสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นดังรูปที่ 4.30 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับกำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงได้ดังรูปที่ 4.31 ตามลำดับ



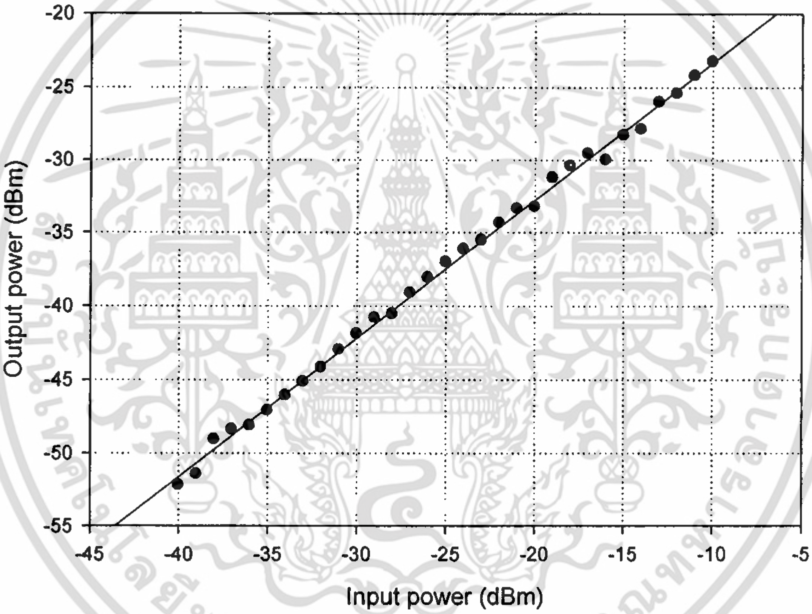
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง

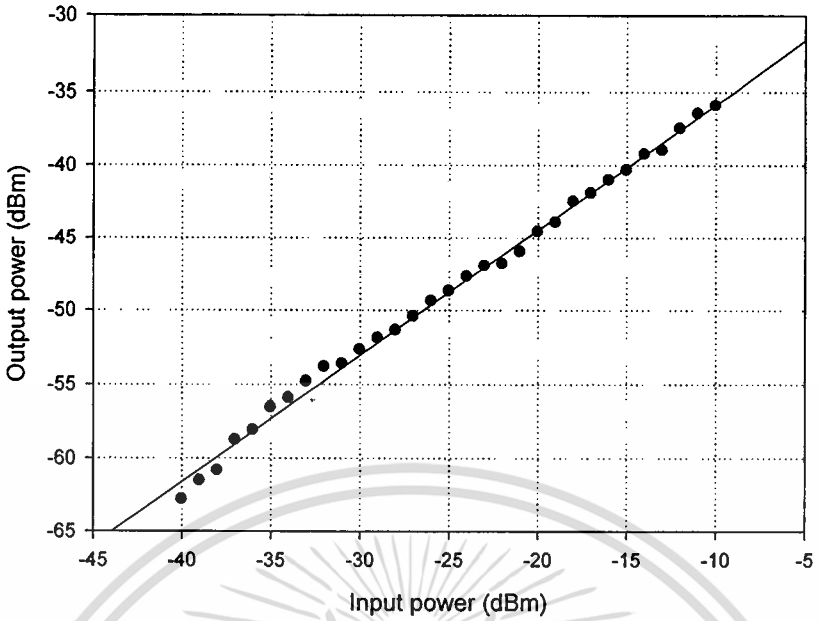
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งผลิตความถี่มูลฐานเท่ากับ 128.20 KHz กำลังของสัญญาณ 3.76 dBm และกำหนดให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์มีความถี่เท่ากับ 85.10 KHz โดยทำการปรับระดับกำลังสัญญาณของสัญญาณอินพุตครั้งละ 1 dBm ตั้งแต่ -40 dBm ถึง -10 dBm และทำการวัดค่ากำลังของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง โดยสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นดังรูปที่ 4.32 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับกำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงได้ดังรูปที่ 4.33 ตามลำดับ



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น

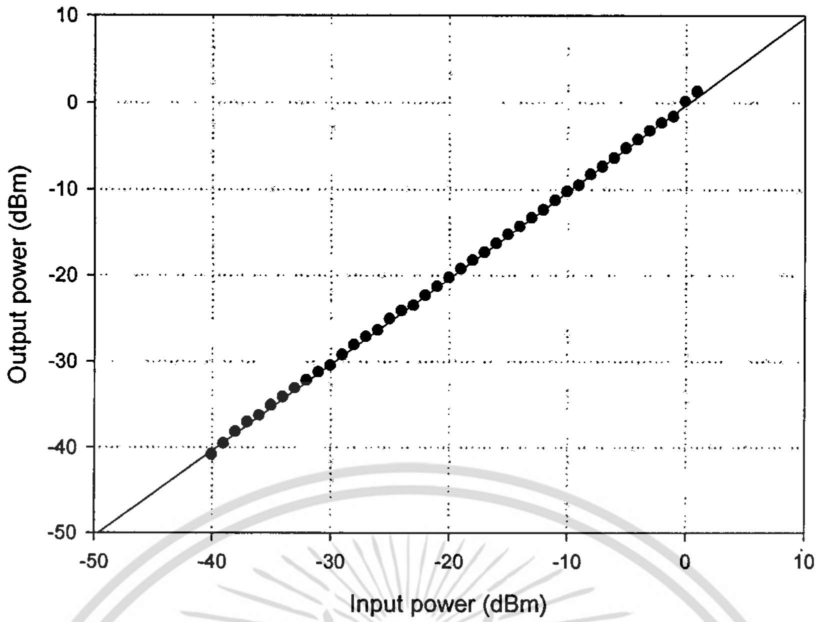
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



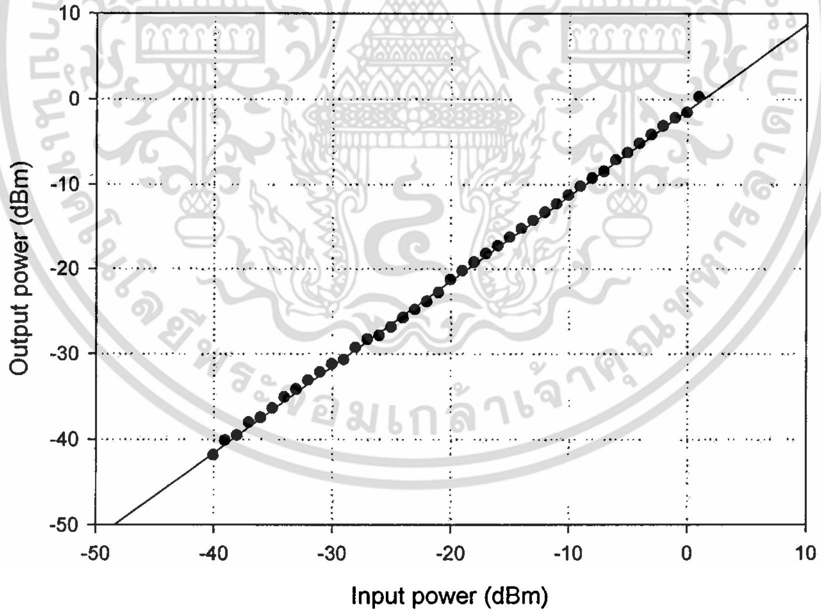
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งผลิตความถี่มูลฐานเท่ากับ 697.80 MHz กำลังของสัญญาณ 1.36 dBm และกำหนดให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์มีความถี่เท่ากับ 550 MHz โดยทำการปรับระดับกำลังสัญญาณของสัญญาณอินพุตครั้งละ 1 dBm ตั้งแต่ -40 dBm ถึง 1 dBm และทำการวัดค่ากำลังของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง โดยสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นดังรูปที่ 4.34 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับกำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงได้ดังรูปที่ 4.35 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น



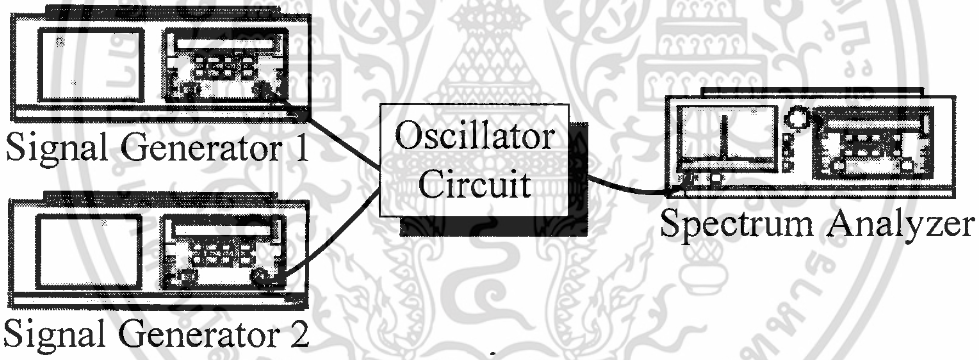
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตกับค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.3 การวัดทดสอบค่า IIP3

ค่า IIP3 (Third-order Input Interception Point) คือค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่จุดตัดของกราฟระหว่างค่าความถี่ที่ออกแบบไว้ที่ความถี่ $f_n \pm f_{f_1}$ กับค่าความถี่กำลังสามที่ความถี่ $f_n \pm (2f_{f_1} \pm f_{f_2})$ ซึ่งเรียกจุดตัดของกราฟนี้ว่าจุดตัดกำลังสาม (Third-order Interception point) โดยค่านี้เป็นตัวชี้วัดว่าวงจรผสมสัญญาณมีความสามารถในการป้องกันสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ที่ใช้งานได้มากน้อยแค่ไหน

โดยการวัดทดสอบค่า IIP3 สามารถวัดทดสอบได้โดยการป้อนอินพุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณสองเครื่อง โดยกำหนดให้ความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณตัวที่ 1 ความถี่ f_{f_1} และกำหนดให้ความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณตัวที่ 2 ความถี่ f_{f_2} ให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณและทำการวัดสัญญาณที่ขาเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ต่ออยู่กับเครื่องสเปกตรัมอนาไลซ์เซอร์ดังรูปที่ 4.36 โดยเมื่อเพิ่มกำลังงานของสัญญาณอินพุตทั้งสองสัญญาณทีละ 1 dBm ค่ากำลังสัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงที่ความถี่ $f_n \pm f_{f_1}$ จะเพิ่มขึ้น 1 dBm และค่ากำลังสัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณความถี่กำลังสามที่ความถี่ $f_n \pm (2f_{f_1} - f_{f_2})$ จะเพิ่มขึ้น 3 dBm

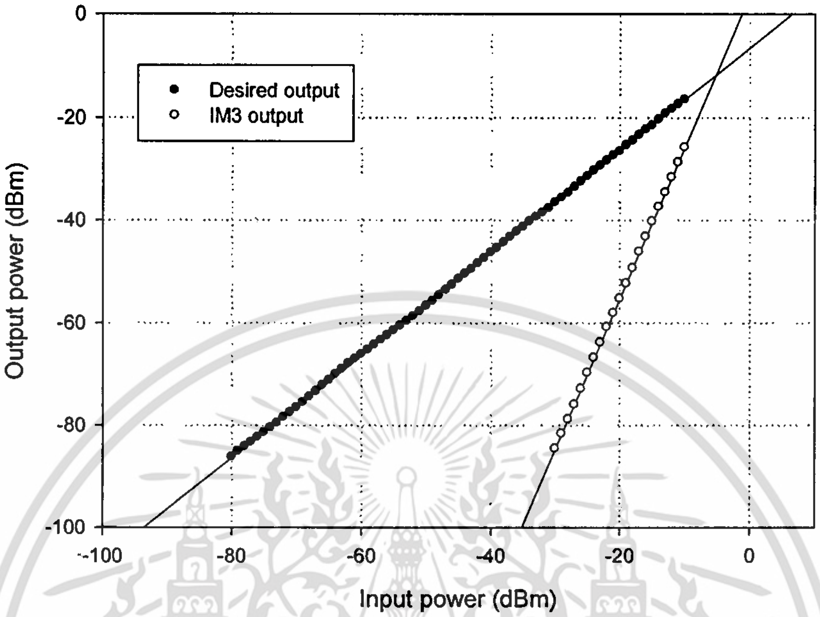


รูปที่ 4.37 การวัดทดสอบค่า IIP3 และ OIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง

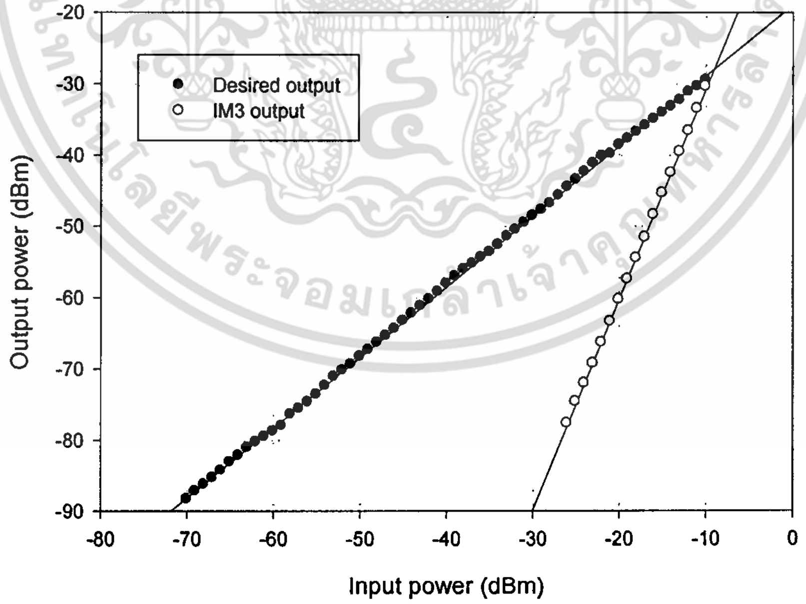
สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งผลิตความถี่มูลฐานเท่ากับ 41.52 KHz กำลังของสัญญาณ 6.89 dBm และกำหนดให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณตัวที่ 1 ความถี่ 25.31 KHz และสัญญาณอินพุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณตัวที่ 2 ความถี่ 26.21 KHz โดยทำการปรับระดับกำลังสัญญาณของสัญญาณอินพุตทั้งสองสัญญาณครั้งละ 1 dBm ตั้งแต่ -80 dBm ถึง -10 dBm และทำการวัดค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงซึ่งได้ความถี่ที่ต้องการวัดที่ความถี่ 66.83 KHz และ 16.21 KHz ตามลำดับและทำการวัดค่ากำลังงานของสัญญาณที่ความถี่กำลังสาม ซึ่งได้ความถี่ที่ต้องการวัดทดสอบที่ความถี่ 65.93 KHz และ 17.11 KHz ตามลำดับ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแสดงกราฟผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นดังรูปที่ 4.37 และผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงได้ดังรูปที่ 4.38 ตามลำดับ



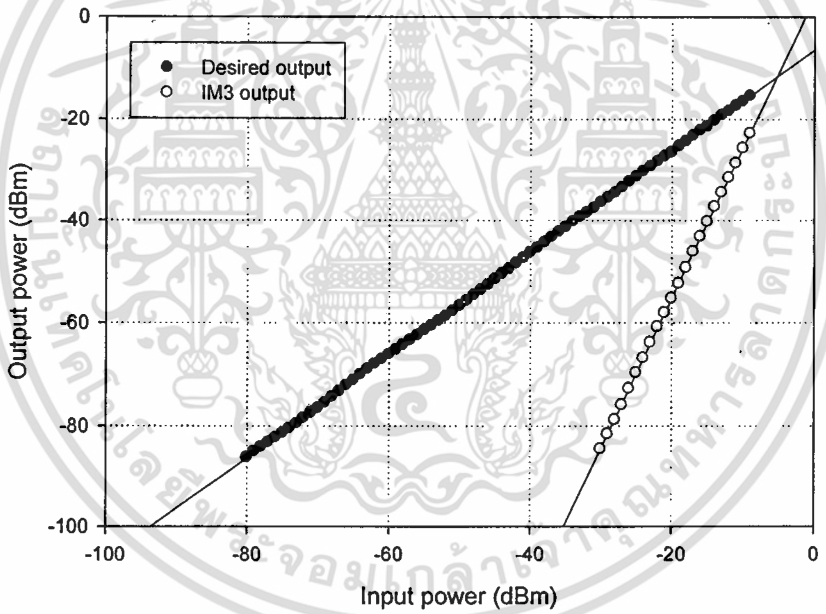
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง

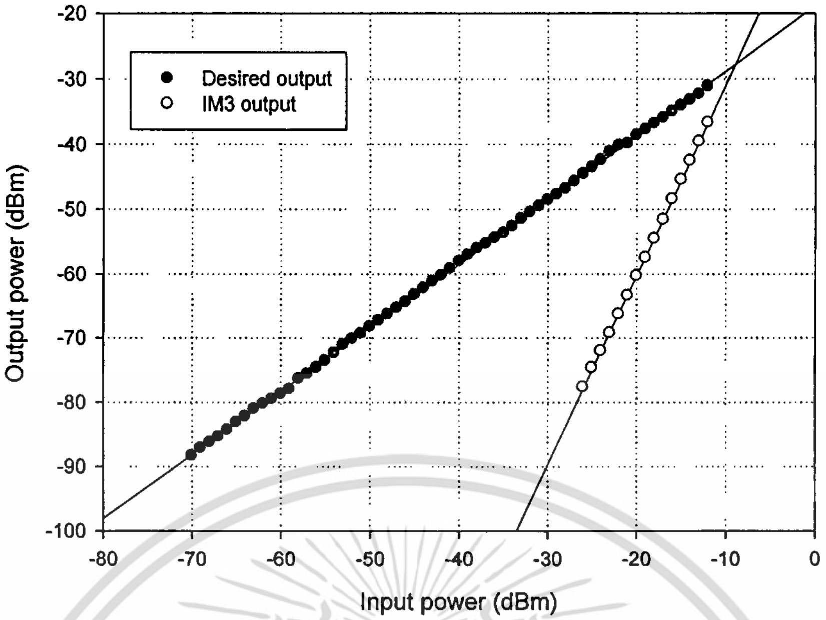
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งผลิตความถี่มูลฐานเท่ากับ 48.40 KHz กำลังของสัญญาณ 5.44 dBm และกำหนดให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสจากเครื่องกำเนิดสัญญาณตัวที่ 1 ความถี่ 31.98 KHz และสัญญาณอินพุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณตัวที่ 2 ความถี่ 32.68 KHz โดยทำการปรับระดับกำลังสัญญาณของสัญญาณอินพุตทั้งสองสัญญาณครั้งละ 1 dBm ตั้งแต่ -80 dBm ถึง -9 dBm และทำการวัดค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงซึ่งได้ความถี่ที่ต้องการวัดที่ความถี่ 80.37 KHz และ 16.42 KHz ตามลำดับและทำการวัดค่ากำลังงานของสัญญาณที่ความถี่กำลังสามซึ่งได้ความถี่ที่ต้องการวัดทดสอบที่ความถี่ 79.68 KHz และ 17.12 KHz ตามลำดับ โดยสามารถแสดงกราฟผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นดังรูปที่ 4.39 และผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงได้ดังรูปที่ 4.40 ตามลำดับ



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น

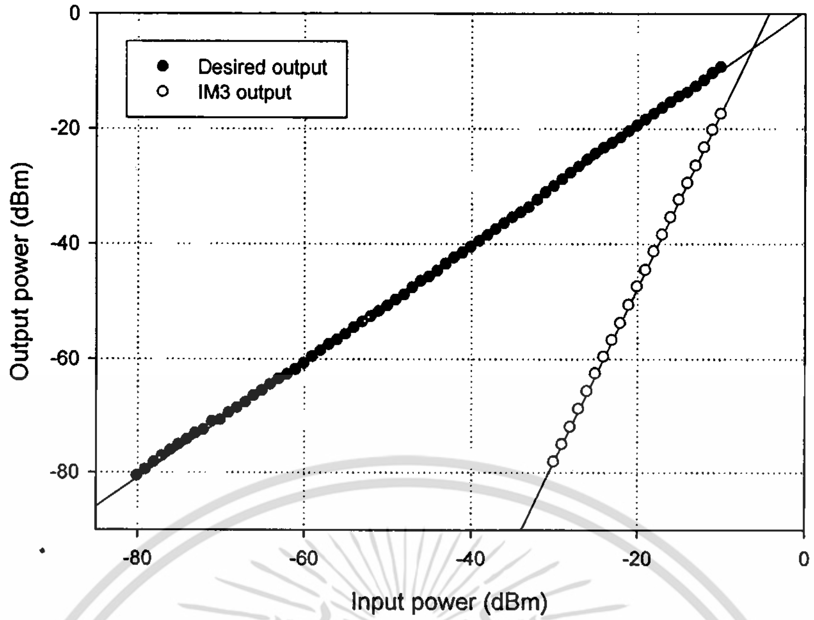
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



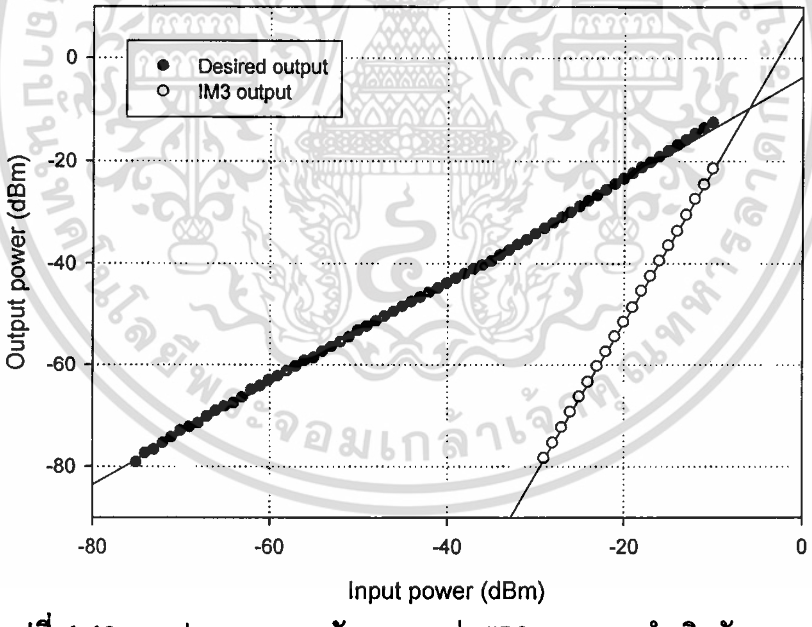
รูปที่ 4.41 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งผลิตความถี่มูลฐานเท่ากับ 90.43 KHz กำลังของสัญญาณ 6.14 dBm และกำหนดให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีจากเครื่องกำเนิดสัญญาณตัวที่ 1 ความถี่ 59.99 KHz และสัญญาณอินพุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณตัวที่ 2 ความถี่ 60.89 KHz โดยทำการปรับระดับกำลังสัญญาณของสัญญาณอินพุตทั้งสองสัญญาณครั้งละ 1 dBm ตั้งแต่ -80 dBm ถึง -10 dBm และทำการวัดค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงซึ่งได้ความถี่ที่ต้องการวัดที่ความถี่ 150.40 KHz และ 30.44 KHz ตามลำดับและทำการวัดค่ากำลังงานของสัญญาณที่ความถี่กำลังสามซึ่งได้ความถี่ที่ต้องการวัดทดสอบที่ความถี่ 149.59 KHz และ 31.34 KHz ตามลำดับ โดยสามารถแสดงกราฟผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นดังรูปที่ 4.41 และผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงได้ดังรูปที่ 4.42 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น

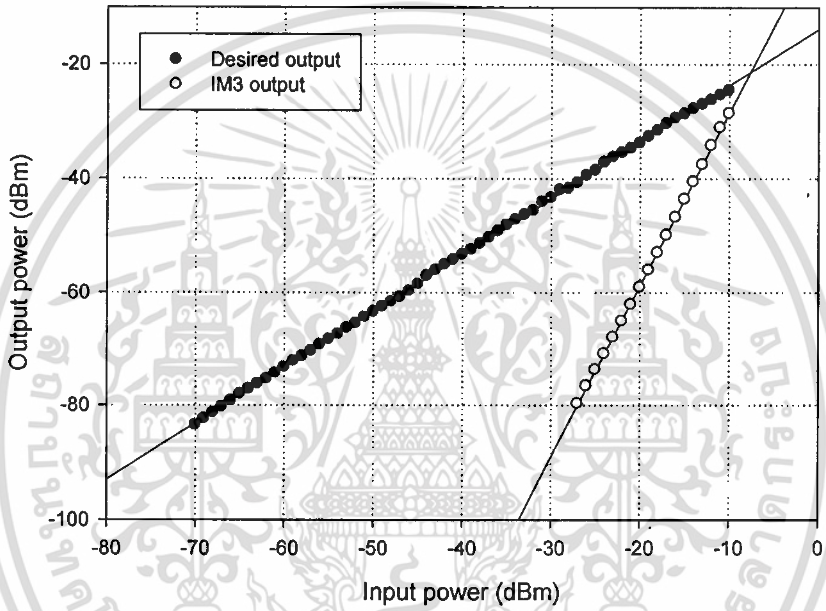


รูปที่ 4.43 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบทวินทีที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งผลิตความถี่มูลฐานเท่ากับ 128.20 KHz กำลังของสัญญาณ 3.76 dBm และกำหนดให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณตัวที่ 1 ความถี่ 85.10 KHz และสัญญาณอินพุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณตัวที่ 2 ความถี่ 86 KHz โดยทำการปรับระดับกำลัง

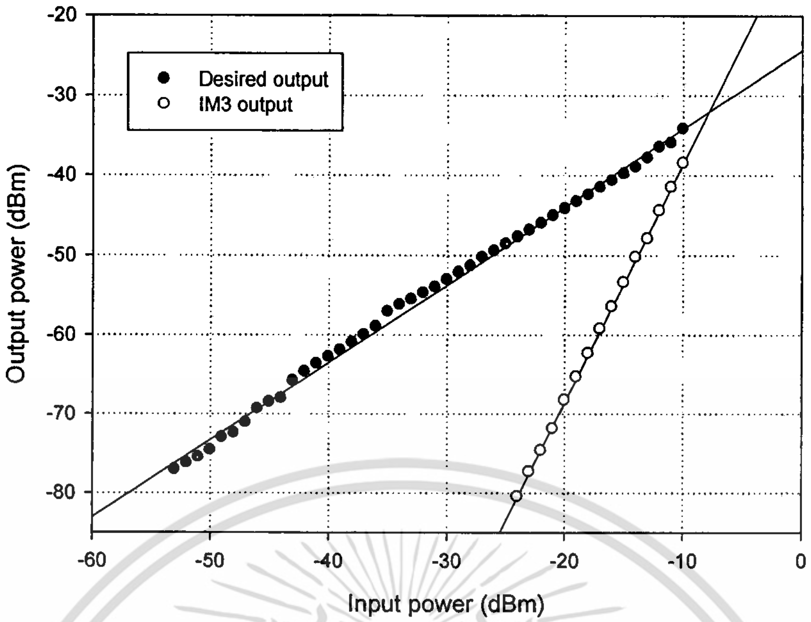
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณของสัญญาณอินพุตทั้งสองสัญญาณครั้งละ 1 dBm ตั้งแต่ -70 dBm ถึง -10 dBm และทำการวัดค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงซึ่งได้ความถี่ที่ต้องการวัดที่ความถี่ 213.30 KHz และ 43.10 KHz ตามลำดับและทำการวัดค่ากำลังงานของสัญญาณที่ความถี่กำลังสามซึ่งได้ความถี่ที่ต้องการวัดทดสอบที่ความถี่ 212.40 KHz และ 44 KHz ตามลำดับ โดยสามารถแสดงกราฟผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นดังรูปที่ 4.43 และผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงได้ดังรูปที่ 4.44 ตามลำดับ



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น

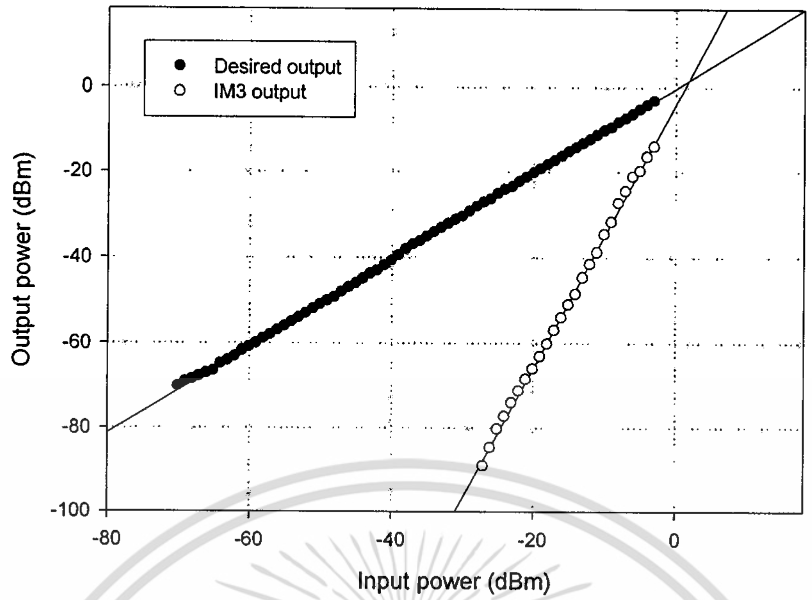
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



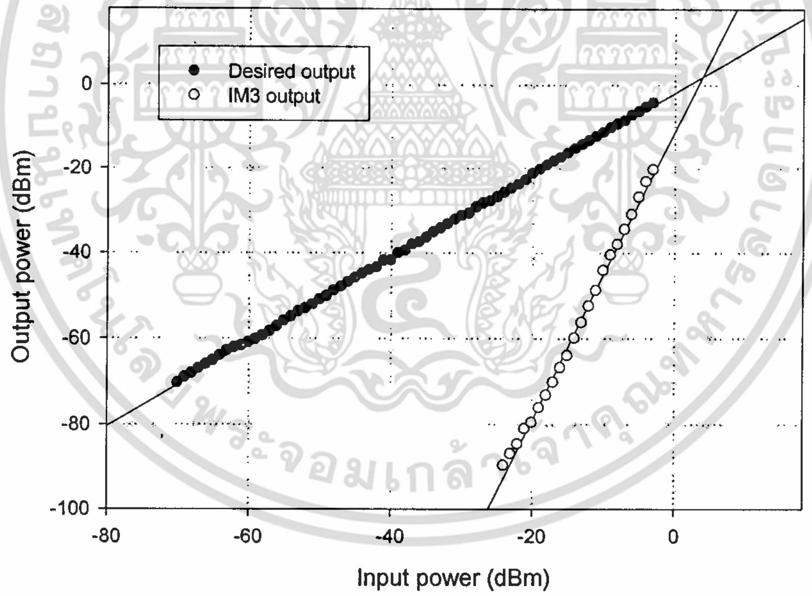
รูปที่ 4.45 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งผลิตความถี่มูลฐานเท่ากับ 697.80 MHz กำลังของสัญญาณ 1.36 dBm และกำหนดให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณตัวที่ 1 ความถี่ 550 MHz และสัญญาณอินพุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณตัวที่ 2 ความถี่ 550.90 MHz โดยทำการปรับระดับกำลังสัญญาณของสัญญาณอินพุตทั้งสองสัญญาณครั้งละ 1 dBm ตั้งแต่ -70 dBm ถึง -7 dBm และทำการวัดค่ากำลังงานของสัญญาณเอาต์พุตที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงซึ่งได้ความถี่ที่ต้องการวัดที่ความถี่ 1.2479 GHz และ 147.8 MHz ตามลำดับและทำการวัดค่ากำลังงานของสัญญาณที่ความถี่กำลังสามซึ่งได้ความถี่ที่ต้องการวัดทดสอบที่ความถี่ 1.2469 MHz และ 148.7 MHz ตามลำดับ โดยสามารถแสดงกราฟผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นดังรูปที่ 4.45 และผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงได้ดังรูปที่ 4.46 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้น



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบค่า IIP3 ของวงจรกำเนิดสัญญาณโคลพิตต์แบบประยุกต์ที่ถูกย้ายย่านความถี่ลง

4.8 สรุป

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาในข้างต้นสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณทั้งในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูง ซึ่งสามารถใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงได้จริง โดยสามารถสรุปผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงได้ดังตารางที่ 4.2 ผลการวัดทดสอบค่าการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นได้ดังตารางที่ 4.3 และผลการวัดทดสอบค่าการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นได้ดังตารางที่ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง

ชนิดของวงจรกำเนิดสัญญาณ	ความถี่มูลฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณ (f_n)	ความถี่ของสัญญาณอินพุต (f_f)	ความถี่ของสัญญาณย้ายย่านความถี่ขึ้น ($f_n + f_f$)	ความถี่ของสัญญาณย้ายย่านความถี่ลง ($f_n - f_f$)
เวนบริดจ์	41.52 KHz	25.31 KHz	66.83 KHz	16.21 KHz
เลื่อนเฟส	48.40 KHz	31.98 KHz	80.37 KHz	16.42 KHz
ทวินที	90.43 KHz	59.99 KHz	150.40 KHz	30.44 KHz
ควอดราเจอร์	128.20 KHz	85.10 KHz	213.30 KHz	43.10 KHz
โคลพิตต์ประยุกต์	697.80 MHz	550 MHz	1.2479 GHz	147.8 MHz

ตารางที่ 4.3 ตารางสรุปผลการวัดทดสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้น

ชนิดของวงจรกำเนิดสัญญาณ	อัตราขยายแปลงผัน	การลดทอน 1 dB	IIP3
เวนบริดจ์	-7.09 dB	-10 dBm	-5.02 dBm
เลื่อนเฟส	-8.02 dB	-8 dBm	-5.42 dBm
ทวินที	-8.67 dB	-10 dBm	-6.04 dBm
ควอดราเจอร์	-16.02 dB	-10 dBm	-7.54 dBm
โคลพิตต์ประยุกต์	0.09 dB	1 dBm	1.92 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางสรุปผลการวัดทดสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำมาประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ลง

ชนิดของวงจรกำเนิดสัญญาณ	อัตราขยายแปลงผัน	การลดทอน 1 dB	IIP3
เวนบริดจ์	-14.92 dB	-10 dBm	-8.91 dBm
เลื่อนเฟส	-25.71 dB	-8 dBm	-8.90 dBm
ทวินที	-26.38 dB	-10 dBm	-5.99 dBm
ควอดราเจอร์	-33.86 dB	-10 dBm	-7.93 dBm
โคลพิตต์ประยุกต์	-1.41 dB	1 dBm	4.19 dBm

แต่เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของวงจรกำเนิดสัญญาณจึงทำให้เกิดสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองธรรมชาติที่ความถี่ซุเปอร์ฮาร์โมนิค ซึ่งทำให้เกิดการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงที่ความถี่ซุเปอร์ฮาร์โมนิค โดยที่การวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 นั้นเป็นการวิเคราะห์บนพื้นฐานความเป็นอุดมคติของวงจรกำเนิดสัญญาณซึ่งไม่มีความถี่ที่ซุเปอร์ฮาร์โมนิค จึงทำให้สามารถอธิบายสเปกตรัมของสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ที่เกิดขึ้นได้ที่ความถี่ฮาร์โมนิคมูลฐานเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการย้ายย่านความถี่แบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณในกรณีที่มีอินพุตบังคับเข้ามาในวงจรโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาสำหรับการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงภายในวงจรเดียวกัน โดยมุ่งเน้นทางด้านการประยุกต์ใช้หลักการการวิเคราะห์การแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาเป็นสำคัญ โดยในการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณโดยทั่วไป ขนาดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่ได้มักขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของสภาวะเริ่มต้น ณ ที่เวลาในสภาวะเริ่มต้นเท่านั้น แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์แบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาในกรณีที่มีอินพุตบังคับเข้ามาในวงจรเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางขนาด ณ ที่เวลาใดๆไม่ใช่แค่ ณ ที่เวลาในสภาวะเริ่มต้นเท่านั้น

ในการย้ายย่านความถี่โดยวิธีทั่วไปจำเป็นต้องอาศัยวงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรผสมสัญญาณทำงานร่วมกัน ซึ่งถ้าหากขาดองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งแล้วนั้นทำให้ไม่สามารถย้ายย่านความถี่ได้ แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์แบบแบ่งแยกตัวแปรทางเวลาในกรณีที่มีอินพุตบังคับเข้ามาในวงจรเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางขนาด ณ ที่เวลาใดๆไม่ใช่แค่ ณ ที่เวลาในสภาวะเริ่มต้นเท่านั้น ซึ่งสามารถย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงได้เพียงแค่ป้อนอินพุตให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณทำให้วงจรกำเนิดสัญญาณประพฤติตัวเป็นทั้งวงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรผสมสัญญาณในเวลาเดียวกันซึ่งไม่จำเป็นต้องอาศัยวงจรผสมสัญญาณเพิ่มเติม โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองกับวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำคือวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเวนบริดจ์ ,เลื่อนเฟส,ทวินที,ควอดราเจอร์ และวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่สูงที่ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิตต์ประยุกต์ สำหรับการประยุกต์ใช้ในการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงนั้นได้ทำการป้อนอินพุตให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณที่ผลิตสัญญาณความถี่อยู่ในขณะนั้น โดยอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณนั้นก็คือสัญญาณตั้งต้นที่ต้องการย้ายย่านความถี่ขึ้นและลง ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ขึ้นหรือสัญญาณที่เป็นผลรวมระหว่างความถี่ของสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณกับสัญญาณอินพุตและทำให้เกิดสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงหรือสัญญาณที่เป็นผลต่างระหว่างความถี่ของสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณกับสัญญาณอินพุต ดังนั้นจากผลการทดลองในบทที่ 4 จึงกล่าวได้ว่าสามารถย้ายย่านความถี่ขึ้นและลงได้ภายในวงจรเดียวโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยวงจรผสมสัญญาณเพิ่มเติมและเมื่อนำสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นผลตอบสนองสมบูรณ์ที่ได้ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำที่เหมาะสมจึงสามารถนำเอาสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่มาใช้งานต่อไปได้ นอกจากนี้จากผลการทดลองเห็นได้ว่าสเปกตรัมของสัญญาณที่ซุเปอร์ฮาร์โมนิคมีกำลังงานที่สูง ซึ่งสามารถที่จะนำไปพัฒนาสำหรับภาคexcept รับและภาคส่งเพื่อใช้ในการย้ายย่านความถี่หลายๆย่านความถี่ได้พร้อมกัน (Multi-band) โดยใช้วงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียวเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์และผลการทดลองที่ได้นำเสนอทำให้สามารถยืนยันได้ว่าเทคนิคที่นำเสนอนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้งวงจรกำเนิดสัญญาณใดก็ได้ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับสองขึ้นไปไม่ว่าจะเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยที่ผลการทดลองของสเปกตรัมสัญญาณผลตอบสนองสมบูรณ์ที่ฮาร์โมนิคมูลฐานนั้นสอดคล้องกับสมการผลตอบสนองสมบูรณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเป็นอย่างดี ซึ่งสามารถแสดงบทสรุปภาพรวมของการย้ายย่านความถี่ระหว่างวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เปรียบเทียบกับวิธีการแบบทั่วไปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปภาพรวมเปรียบเทียบระหว่างหลักการย้ายย่านความถี่แบบทั่วไปกับหลักการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

หัวข้อในการเปรียบเทียบ	หลักการแบบทั่วไป	หลักการการที่นำเสนอ
ขนาดของวงจร	ขนาดใหญ่	ขนาดเล็ก
ความซับซ้อนในการสร้าง	ซับซ้อนมาก	ซับซ้อนน้อย
วงจรที่ใช้สำหรับการย้ายย่านความถี่	วงจรผสมสัญญาณและวงจรกำเนิดสัญญาณ	วงจรกำเนิดสัญญาณ
เทคนิคในการวิเคราะห์ระบบสำหรับการย้ายย่านความถี่	สมการอนุกรมกำลัง	สมการอนุพันธ์อันดับที่สอง

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณจำเป็นต้องสร้างให้มีความใกล้เคียงกับความเป็นอุดมคติมากที่สุดซึ่งช่วยให้สามารถลดทอนสัญญาณที่ไม่ต้องการลงได้หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือสามารถลดทอนสัญญาณความถี่ที่ซูเปอร์ฮาร์โมนิคลงได้และความถี่ของสัญญาณอินพุตต้องไม่ใกล้กับความถี่ของสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณมากเกินไป เพราะทำให้เกิดปรากฏการณ์อินเจคชั่นล็อค (Injection Lock) ซึ่งเป็นการล็อคกันของความถี่ของสัญญาณอินพุตและความถี่ของสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณที่ผลิตออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] วิวัฒน์ กิรานนท์, **วิศวกรรมสื่อสาร**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 4, พ.ศ. 2540

[2] George D. Vendelin, Anthony M. Pavio, Ulrich L. Rohde, **Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques**, Hoboken, New Jersey, United States, John Wiley & Sons, 2005.

[3] Reinhold Ludwig, Pavel Bretchko, **RF Circuit Design Theory and Application**, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2000.

[4] Stephen A. Maas, **Nonlinear Microwave and RF Circuits**, Cannon Street, Norwood, Artech house, 2003.

[5] T. Maneechukate, T. Tuwanut, P. Koseeyaporn, P. Wardkein, **"New analytic solution of second-order oscillator using multi-time variables technique,"** Intelligent Signal Processing and Communication Systems, pp. 637-640, 13-16 December 2005.

[6] T. Maneechukate, J. Koseeyaporn, P.Wardkein, P. Koseeyaporn, **"Wide-band amplitude control of the second-order oscillator circuit,"** Int. J. Electronics and Communications, vol. 62 (9), pp. 666-673, Oct. 2008.

[7] T. Maneechukate, K. Prompak, J. Koseeyaporn, P. Wardkein, **"Accuracy behavior explanation of electrical second-order system based on multi-time technique,"** Scientific Research and Essays, vol. 8(25), pp. 1180-1190, 4 Jul. 2013.

[8] K. Prompak, A. Kaewpoonsuk, T. Maneechukate, P. Wardkein, **"An oscillation discovery of the forced vibrating system predicted by the multi-time differential equation,"** Scientific Research and Essays, vol. 7(39), pp. 3292-3301, 4 Oct. 2012.

[9] คุณานนต์ กิตติพุฒิ, จีรสุดา โกษียาภรณ์, ไพฑูรย์ พรหมสุภรณ์, และปราโมทย์ วาดเขียน, **"การมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วยการมอดูเลต AM & FM บนความถี่คลื่นพาห์เดียวภายในวงจรเดียวกัน,"** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32, 28 – 30 ต.ค. 2552

[10] จีรสุดา โกษียาภรณ์, **วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 1, พ.ศ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] ปราโมทย์ วาดเขียน, **สัญญาณและระบบต่อเนื่องขั้นสูงทางอิเล็กทรอนิกส์**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 1, พ.ศ. 2553

[12] Richard C. Jaeger, Travis N. Blalock, **Microelectronic Circuit Disign**, Avenue of Americas, New York, The McGraw-Hill, 2010.

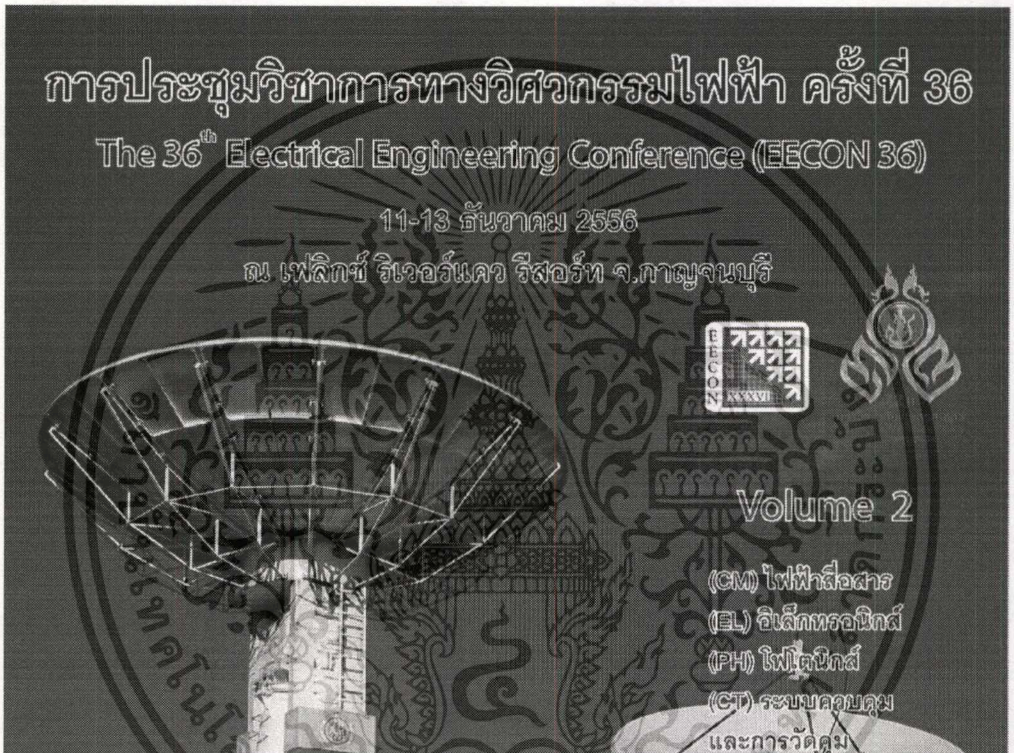
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. สุรเชษฐ์ ภาณุพัฒนา, กฤษณ์ ไชยวงศ์, คุณานนต์ กิตติพุฒิ, จีรสุดา โกษียาภรณ์และปราโมทย์ วาดเขียน, **“การย้ายย่านความถี่ลงด้วยการป้อนอินพุตบังคับให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณอันดับสองบนพื้นฐานการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา,”** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36, 11 – 13 ธ.ค. 2556



เอกสารนี้เ... ...านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การย้ายย่านความถี่ลงด้วยการป้อนอินพุตบังคับให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณอันดับสองบนพื้นฐานการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา

Frequency Down Converter by Using Second Order Forced Oscillator Based on Separate Time's Variable Analysis

สุรเชษฐ์ ภาณุพัฒนา[1] กฤษณ์ ไชยวงศ์[2] คุณานนต์ กิตติพุฒิ[3] จีรสุดา โกษียาภรณ์[1] ปราโมทย์ วาดเขียน[1]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10520 E-mail: nutfunny01@gmail.com

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000

[3]แผนกเทคโนโลยีอวกาศ กองกิจการอวกาศ ศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศกองทัพอากาศ 171 ถนนเดชะตุงคะ แขวงสีกัน เขตดอนเมือง กทม. 10210 โทรศัพท์ : 0805550030 E-mail: kunanon.kit@gmail.com

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้นำเสนอการสร้างวงจรย้ายย่านความถี่ด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ภายใต้สภาวะอินพุตบังคับเพียงวงจรเดียว เนื่องจากสภาวะดังกล่าวมีพฤติกรรมการทำงานเสมือนวงจรกำเนิดสัญญาณ และวงจรคูณสัญญาณในเวลาเดียวกัน โดยพฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณอันดับสองภายใต้อิทธิพลฟังก์ชั่นบังคับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเทคนิคทางตัวแปรเวลาหลายตัวจากหลักการดังกล่าวข้างต้นทำให้เราสามารถสร้างวงจรย้ายย่านความถี่ที่มีขนาดเล็ก และไม่จำเป็นต้องสร้างวงจรคูณกับวงจรกำเนิดสัญญาณแยกกัน โดยจากผลการทดลองที่ได้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

คำสำคัญ: อินพุตบังคับ,ออสซิลเลเตอร์,เทคนิคทางตัวแปรเวลาหลายตัว,การย้ายย่านความถี่ลง

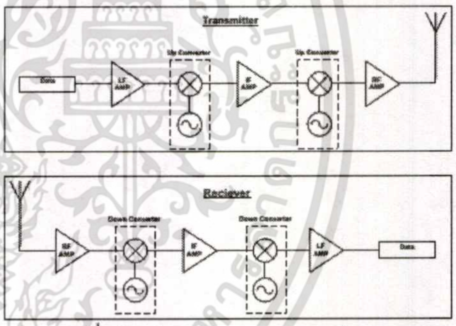
Abstract

In this paper , a frequency down converter circuit created by second-order forced oscillator base on force function was proposed. According to the proposed, it behaved like the oscillator circuit and the multiplier circuit simultaneously. By this behavior, it was explained by the second-order oscillator under the influence of the time-varying and multi-time technique. In this article, the frequency down convert circuit was built in a small size as only oscillator circuit needed. The result showed that the proposed circuit performed as good as the principle.

Keywords: Forced oscillator , Oscillator , Multi-time, Down convertor

1. บทนำ

ด้วยความก้าวหน้าทางวิศวกรรม และเทคโนโลยีในปัจจุบัน ทำให้การดำเนินชีวิตเต็มไปด้วยสิ่งอำนวยความสะดวกในหลายด้านเช่น ด้านการสื่อสาร ด้านพลังงาน ด้านคมนาคมเป็นต้น สำหรับเทคโนโลยีด้านการสื่อสารนั้นมีหลายระบบในการใช้งาน ซึ่งระบบสื่อสารที่มีผลต่อชีวิตมนุษย์อย่างมากนั้นคือระบบการสื่อสารไร้สาย โดยการทำงานของระบบการสื่อสารไร้สายนั้นประกอบไปด้วยภาคส่งและภาครับสัญญาณ และภายในวงจรรวมภาคส่งหรือภาครับนั้นมีหลายองค์ประกอบที่รวมกันอยู่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของภาคส่งและภาครับของระบบการสื่อสารไร้สาย

จากรูปที่ 1 องค์ประกอบที่ขาดไม่ได้ในทั้งภาคส่งและรับสำหรับทุกระบบการสื่อสารไร้สายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันคือการย้ายย่านความถี่[1] การย้ายย่านความถี่นี้มีใช้งานในหลายระบบการสื่อสารเช่นระบบการสื่อสารดาวเทียม ระบบการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นต้น[2] โดยในภาคส่งต้องมีการแปลงสัญญาณย่านความถี่กลางให้ขึ้นมาอยู่ในย่านความถี่สูง และในภาครับต้องมีการแปลงสัญญาณย่านความถี่สูงให้ลงมาอยู่ในย่านความถี่กลาง การย้ายย่านความถี่มีจุดประสงค์หลักเพื่อให้เกิดความสะดวกในการขยายสัญญาณเพื่อให้การย้ายย่านความถี่ประสบผล มีความจำเป็นต้องอาศัยวงจรคูณและวงจรกำเนิดสัญญาณเป็นสำคัญ ในส่วนของวงจรคูณโดยทั่วไปนั้นแบ่งออกเป็นสองประเภทนั่นคือวงจรคูณแบบแอคทีฟ (active) แบบแพสซิฟ (passive) โดยวงจรคูณจะมีคุณลักษณะของการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในบทความนี้ได้รวมวงจรกำเนิดสัญญาณเข้ากับวงจรคูณ โดยอาศัยวงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ภายใต้อิทธิพลของฟังก์ชั่นบังคับที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในสถานการณ์ที่มีอินพุทป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณ[3-4] ข้อเด่นสำคัญของวงจรนี้คือง่ายต่อการสร้าง วงจรที่มีขนาดเล็ก และไม่จำเป็นต้องออกแบบสร้างวงจรคูณและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกำเนิดสัญญาณแยกกันเมื่อเทียบกับวิธีอื่น[5] เช่นวงจรคูณแบบมิกเซอร์ (mixer) และ วงจรคูณแบบใช้ไดโอด เป็นต้นโดยวิธีนี้สามารถใช้ได้กับวงจรกำเนิดสัญญาณใดก็ได้ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับที่สองขึ้นไป เพื่อยืนยันหลักการที่ประยุกต์ใช้สำหรับย่านความถี่ต่ำ จึงได้ยกตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ต่ำแบบเฟส-ชิฟ โดยสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณย่านความถี่สูงได้ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิตต์ เพื่อเป็นตัวอย่างยืนยันการทำงานของหลักการที่นำเสนอ ในบทความนี้ประกอบไปด้วย 4 หัวข้อดังต่อไปนี้ หัวข้อที่ 2 กล่าวถึงหลักการย้ายย่านความถี่โดยอาศัยพื้นฐานฟังก์ชั่นบังคับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของวงจรกำเนิดสัญญาณที่อธิบายด้วยสมการอนุพันธ์อันดับสอง และในหัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการย้ายย่านความถี่ลงมา ส่วนในหัวข้อที่ 4 จะกล่าวถึงบทสรุปและวิจารณ์ของบทความ

2. ทฤษฎีและหลักการ

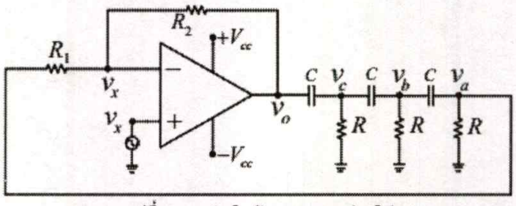
ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายการย้ายย่านความถี่โดยอาศัยหลักการพื้นฐานฟังก์ชั่นบังคับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ที่สามารถจำลองได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับสอง ซึ่งสามารถแสดงผลตอบสนองสมบูรณ์[3-6]ได้ดังสมการที่ (1)

$$v_o(t,\tau)=\left(X_0-v_{of}(\tau)\right)\cos\left(\omega_n t\right)+v_{of}(\tau) \qquad (1)$$

กำหนดให้ค่าคงที่ X_0 คือค่าสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้นและ ω_n คือความถี่ออสซิลเลต โดยที่ $v_o(t,\tau)$ เป็นผลตอบสนองสมบูรณ์ที่ประกอบไปด้วยผลตอบสนองทางธรรมชาติ $v_{on}(t)$และผลตอบสนองบังคับ $v_{of}(\tau)$ เป็นผลตอบสนองบังคับของระบบกำเนิดสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการป้อนอินพุต $v_i(\tau)$ ให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณ ณ เวลาใดๆหลังจากระบบทำงานสมบูรณ์แล้วสำหรับตัวแปรทางเวลา τ และ t นั้นมีความสัมพัทธกันอยู่ ($\tau\equiv t+t_0$ โดยที่ t_0 คือช่วงเวลาเริ่มต้น) และสามารถแยกออกจากกันได้เนื่องจากมีความเป็นอิสระต่อกัน เพื่อง่ายต่อการแสดงการวิเคราะห์จึงได้กำหนดให้สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์และประมาณค่าให้ผลตอบสนองบังคับมีค่าเท่ากับอินพุตบังคับ $v_{of}(\tau)\approx v_i(\tau)=A_c\cos\left(\omega_c\tau\right)$ (ให้ความถี่อินพุต ω_c น้อยกว่าความถี่ธรรมชาติ ω_n) และให้เวลาเริ่มต้นมีค่าน้อยมาก $t_0\approx 0$ จึงทำให้ สามารถแสดงสมการ (1) ได้ใหม่ดังสมการ (2)

$$\begin{aligned} v_o(t,\tau)=&-\frac{A_c\cos\left(\left(\omega_n-\omega_c\right)t\right)}{2}+X_0\cos\left(\omega_n t\right)\\ &-\frac{A_c\cos\left(\left(\omega_n+\omega_c\right)t\right)}{2}+A_c\cos\left(\omega_c t\right) \end{aligned} \qquad (2)$$

สังเกตพจน์แรกด้านขวาของสมการ (2) พจน์ที่มีความถี่เป็นผลต่างระหว่างความถี่ธรรมชาติ(ความถี่ของโลคอลออสซิลเลเตอร์)และความถี่อินพุต (ความถี่ของสัญญาณ ที่ต้องการย้ายย่านความถี่) ซึ่งเราสามารถนำวงจรกรองสัญญาณมาเลือกกรองเฉพาะสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงมาแล้วได้เพื่อเป็นการยืนยันว่าหลักการที่ได้นำเสนอในข้างต้น จึงได้ทำการทดลองกับวงจรกำเนิดสัญญาณทั้งความถี่ต่ำและสูง โดยในวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ต่ำที่นำเสนอในบทความนี้ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเฟส-ชิฟ และสำหรับย่านความถี่สูงได้ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิตต์โดยแรกเริ่มเราจะวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์โดยที่ไม่มีอินพุทบังคับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อหาผลตอบสนองตามธรรมชาติก่อน จากการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเฟส-ชิฟ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเฟส-ชิฟ

ด้วยการวิเคราะห์โหนดของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเฟส-ชิฟ ดังรูปที่2 จึงได้ความสัมพันธ์เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{v_x-v_a}{R_1}+\frac{v_x-v_0}{R_2}=0 \qquad (3)$$

$$\frac{v_a-v_x}{R_1}+\frac{v_a}{R}+\left(v_a-v_b\right)Cs=0 \qquad (4)$$

$$\left(v_b-v_a\right)Cs+\frac{v_b}{R}+\left(v_b-v_c\right)Cs=0 \qquad (5)$$

$$\left(v_c-v_b\right)Cs+\frac{v_c}{R}+\left(v_c-v_0\right)Cs=0 \qquad (6)$$

โดยที่ v_x คือแรงดันที่ขาลบและขาบวกของออป-แอมป์ และ v_o คือ แรงดันที่ขาเอาท์พุต เมื่อทำการวิเคราะห์สมการโหนดที่จุดรวม v_x , v_a , v_b , และ v_c ดังสมการที่ (3),(4),(5) และ(6) ตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 2 v_x จะต่อลงกราวที่ขาบวกของออป-แอมป์ทำให้ค่า v_x เท่ากับ 0 และหลังจากที่แก้สมการหา v_o ซึ่งจะสามารถหาความถี่ของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ได้ ดังสมการที่ (7)

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} \qquad (7)$$

จากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเฟส-ชิฟในรูปที่ 2 จะป้อนสัญญาณอินพุตบังคับไปที่ขาอินพุตบวกของออป-แอมป์ เมื่อทำการวิเคราะห์ โหนดของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเฟส-ชิฟที่ถูกป้อนอินพุต และทำการ จัดรูปสมการแสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$V_o(s)=\left(\frac{\left(R_1+R_2\right)s^3C^3R^3}{R_2+s^3C^3R^3\left(R_1+R_2+3R_2R+3R_2R^2\right)}\right)V_i(s) \qquad (8)$$

เมื่อทำการวิเคราะห์สมการที่(8) เนื่องจากพจน์อื่น มีค่ามากกว่า R_2 มาก จึงทำการละทิ้ง R_2 ไป ซึ่งจะสามารถหาฟังก์ชั่นส่งผ่าน $V_o(s)/V_i(s)$ ซึ่งจะมีขนาดและเฟสดังสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ

$$\left|\frac{V_o(s)}{V_i(s)}\right|=A_p=\frac{R_1+R_2}{R_1+R_2+3R_2R+3R_2R^2} \qquad (9)$$

$$\angle V_o(s)/V_i(s)=0 \qquad (10)$$

เพื่อที่จะยืนยันถึงหลักการในการย้ายย่านความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยการป้อนฟังก์ชันบังคับ $v_i(\tau)$ ดังสมการที่ (11) เข้าไปในวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเฟส-ชิฟ

$$v_i(\tau)=A_f\cos(\omega_f\tau) \qquad (11)$$

โดยที่ A_f และ ω_f คือขนาดและความถี่ของสัญญาณอินพุตบังคับที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเฟส-ชิฟจากการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณแบบเฟส-ชิฟ จะได้ค่าผลตอบสนองบังคับ ดังสมการที่ (12)

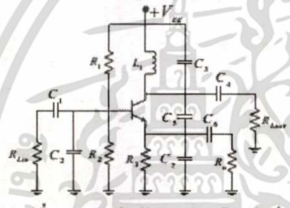
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{ofp}(\tau) = A_p A_f \cos(\omega_f \tau) \quad (12)$$

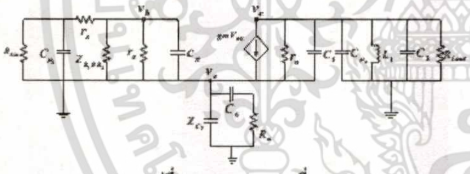
เมื่อนำสัญญาณเอาท์พุดนี้มาแทนเป็นผลตอบสนองบังคับในสมการ (1) โดยให้ $v_{ofp}(\tau) = v_{of}(\tau)$ และ $\omega_f = \omega_c$ จะได้ค่าผลตอบสนองสมบูรณ์ ดังสมการที่ (13)

$$v_o(t,\tau) = -\frac{A_p A_f \cos\left(\left(\omega_n - \omega_f\right)t\right)}{2} + X_0 \cos\left(\omega_n t\right) - \frac{A_p A_f \cos\left(\left(\omega_n + \omega_f\right)t\right)}{2} + A_p A_f \cos\left(\omega_f t\right) \quad (13)$$

ในการวิเคราะห์สำหรับย่านความถี่สูงได้ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิตต์ดังรูปที่ 3เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของ C_1 , C_2 และ C_4 มีค่าน้อยมาก ซึ่งในย่านความถี่สูงจะเปรียบเสมือนเป็นการลัดวงจร โดยค่าอิมพีแดนซ์ของ $R_3 \,//\, Z_{C_7}$ ประมาณค่าได้เป็น Z_{C_7} เนื่องจากค่า C_7 มีค่าน้อยกว่ามากที่ความถี่สูง เมื่อความถี่สูงขึ้น L_1 จะมีค่ามาก โดยจะสามารถประมาณค่าอิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ Z_{L_1} ทำให้สามารถลดรูปวงจรได้ดังรูปที่ 4[7]



รูปที่ 3 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิตต์



รูปที่ 4 วงจรสมมูลความถี่สูง

เมื่อทำการวิเคราะห์โหนด ของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิตต์ในรูปที่ 4 จึงได้ความสัมพันธ์เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{v_e}{Z_{C_7}} + \frac{A_1 v_e}{Z_{C_6}} + \frac{v_e}{Z_b} + \frac{v_e}{Z_a} - \frac{v_b}{Z_b} - \frac{v_c}{Z_a} - gmV_{be} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{A_0 v_b}{r_x} + \frac{v_b}{Z_{C_{\mu_i}}} + \frac{v_b}{Z_b} - \frac{v_e}{Z_b} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{v_c}{Z_b} + \frac{v_c}{Z_o} + \frac{v_c}{Z_{C_{\mu_o}}} - \frac{v_e}{Z_b} + gmV_{be} = 0 \quad (16)$$

โดยที่ v_b คือแรงดันที่ขาเบส, v_e คือแรงดันที่ขาอิมิตเตอร์และ v_c คือแรงดันที่ขาคอลเลคเตอร์ โดยที่ค่า

$$A_1 = \left(1 - \frac{R_o}{Z_{C_6} + R_o}\right), \; A_0 = \left(1 - \frac{R_{L_{in}} Z_{R_1 // R_2}}{Z_{R_1 // R_2} r_x + R_{L_{in}} r_x + R_{L_{in}} Z_{R_1 // R_2}}\right)$$

$$Z_a = \left(\frac{r_o Z_{C_5}}{r_o + Z_{C_5}}\right), \; Z_o = \left(\frac{Z_{L_1} Z_{C_3} R_{L_{out}}}{Z_{L_1} + Z_{C_3} + R_{L_{out}}}\right) \text{ และ } Z_b = \left(\frac{R_\pi Z_{C_\pi}}{R_\pi + Z_{C_\pi}}\right)$$

หลังจากที่ทำการแก้สมการ(14),(15)และ(16) ตามลำดับแล้ว v_c จะได้เป็นสัญญาณรูปไซน์ความถี่ดังสมการ (17)

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2\sqrt{2}R_{L_{out}} C_{\mu_o} + 2R_{L_{out}}}{2{C_3}^2{L_1}^2 + 2{R_{L_{out}}}^2{C_{\mu_o}}^2{L_1}^2 + 4{L_1}^2 C_{\mu_o} C_3}} \quad (17)$$

จากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิตต์ในรูปที่ 4 จะป้อนสัญญาณอินพุตบังคับไปที่ขาเบส เนื่องจากค่าที่น้อยมากของ C_π , v_{be} ซึ่งเป็นแรงดันตกคร่อม ทำให้ C_π จึงมีค่าน้อยไปด้วย จึงสามารถที่จะละค่า gmv_{be} ได้ โดยจะสามารถหาฟังก์ชั่นส่งผ่าน $V_o(s)/V_i(s)$ ซึ่งจะมีขนาดและเฟสดังสมการที่ (18) และ (19) ตามลำดับ

$$\left|\frac{V_o(s)}{V_i(s)}\right| = A_z = \frac{\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}\right)U}{B} \quad (18)$$

$$\angle V_o(s)/V_i(s) = 0 \quad (19)$$

โดยที่ $U = C_5 C_6 R_o + C_{\mu_o} C_6 R_{out} + C_3 C_6 R_o$ และ
$B = C_5 C_{\mu_i} + C_{\mu_o} C_{\mu_i} + C_3 C_{\mu_i} + C_5 C_7 + C_{\mu_o} C_7 + C_3 C_6 + C_5 C_{\mu_o} + C_5 C_3 + C_5 C_7 + C_{\mu_o} C_7 + C_3 C_7$

เพื่อที่จะยืนยันถึงหลักการในการย้ายย่านความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ในย่านความถี่สูง โดยการป้อนฟังก์ชันบังคับ $v_i(\tau)$ ดังสมการที่ (20) เข้าไปในวงจรกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิตต์

$$v_i(\tau) = A_k \cos(\omega_k \tau) \quad (20)$$

โดยที่ A_k และ ω_k คือขนาดและความถี่ของสัญญาณอินพุตบังคับจากการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณแบบโคลพิตต์ จะได้ค่าผลตอบสนองบังคับ ดังสมการที่ (21) และเมื่อนำสมการที่(21)มาแทนเป็นผลตอบสนองบังคับในสมการ (1) โดยให้ $v_{ofc}(\tau) = v_{of}(\tau)$ และ $\omega_k = \omega_c$ จะได้ค่าผลตอบสนองสมบูรณ์ ดังสมการที่ (22)

$$v_{ofc}(\tau) = A_z A_k \cos(\omega_k \tau) \quad (21)$$

$$v_o(t,\tau) = -\frac{A_z A_k \cos\left(\left(\omega_n - \omega_k\right)t\right)}{2} + X_0 \cos\left(\omega_n t\right) - \frac{A_z A_k \cos\left(\left(\omega_n + \omega_k\right)t\right)}{2} + A_z A_k \cos\left(\omega_k t\right) \quad (22)$$

จากผลที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่าพจน์แรกทางขวามือของสมการ (13) และ(22) ที่หาได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูง จะเป็นสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงมาแล้ว โดยจะนำสัญญาณที่ได้ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ เพื่อนำเอาสัญญาณความถี่ต่ำไปใช้งานต่อไปได้

3. ผลการทดลอง

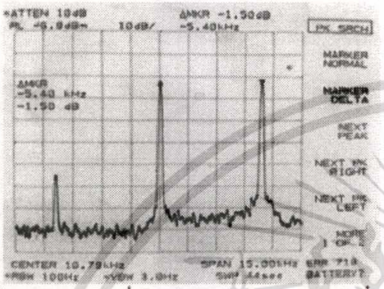
เมื่อทำการทดลองวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์แบบเฟส-ชิฟจริงจากรูปที่ 2 โดยกำหนดค่าดังต่อไปนี้

$+V_{CC} = +7V$, $-V_{CC} = -7V$, $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 30k\Omega$,
$R = 4k\Omega$, $C = 0.001\mu F$,

สัญญาณเอาท์พุดที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่ปราศจากฟังก์ชันบังคับ เมื่อวิเคราะห์ค่าผ่านเครื่องสเปกตรัมจะได้ผลเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ 16.19 kHz หลังจากนั้นนำสัญญาณคลื่นรูปไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 10.79 kHzเข้าเป็นฟังก์ชั่นอินพุตบังคับในขาบวกของออป-แอมป์ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเข้าไปในวงจรจะทำให้เกิดความถี่แถบข้าง 16.19 kHz ± 10.79 kHz แต่เนื่องจากเราสนใจในการย้ายย่านความถี่ลง จึงดูที่สัญญาณที่ถูกย้ายความถี่ลงมา โดยจะสามารถแสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณที่วัดได้หลังจากย้ายย่านความถี่ลงมาที่ความถี่ 5.4 kHz โดยจะมีค่าความไว (sensitivity) ที่ -20 dBm โดยจะสามารถแสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณอินพุต,สัญญาณที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์และสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงได้ดังรูปที่5

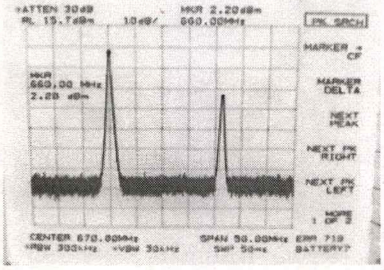


รูปที่ 5 สัญญาณสเปกตรัมเมื่อป้อนอินพุตบังคับ แท่งสเปกตรัมที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของรูป คือ ผลที่ได้จากการย้ายย่านความถี่ลงที่ความถี่ 5.4 kHz แท่งสเปกตรัมที่อยู่ตรงกลางของรูป คือ สเปกตรัมของสัญญาณอินพุต ความถี่ 10.79 kHz และแท่งสเปกตรัมที่อยู่ทางด้านขวามือของรูป คือสเปกตรัมของความถี่โลคอลออสซิลเลเตอร์ที่ความถี่ 16.19 kHz

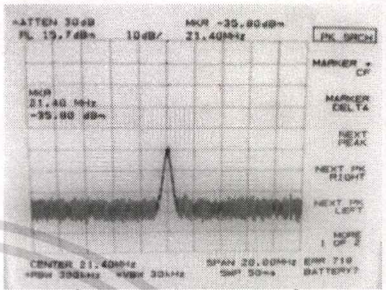
ในส่วนของย่านความถี่สูงเมื่อทำการทดลองวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์จริงจากรูปที่ 3 โดยกำหนดค่าดังต่อไปนี้

$C_1 = 3pF$, $C_2 = 3pF$, $C_3 = 470nF$, $C_4 = 470nF$,
$C_5 = 3pF$, $C_6 = 3pF$ $C_7 = 22pF$, $L_1 = 12nH$, $R_o = 50\Omega$,
$R_1 = 220\Omega$ $R_2 = 2.2k\Omega$, $R_3 = 1k\Omega$, $V_{cc} = 12V$.

สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่ปราศจากฟังก์ชันบังคับ เมื่อวิเคราะห์ค่าผ่านเครื่องสเปกตรัมจะได้ผลเป็นคลื่นรูปไซน์ที่ความถี่ 660 MHz หลังจากนั้นนำสัญญาณรูปไซน์ความถี่ 681.40 MHzเข้าเป็นฟังก์ชั่นอินพุตบังคับ โดยจะสามารถแสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ดังรูปที่6 เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเข้าไปในวงจรจะทำให้เกิดความถี่แถบข้าง 660 MHz ± 681.40 MHz สัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงมา จะสามารถแสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณที่วัดได้หลังจากย้ายย่านความถี่ลงมาที่ความถี่ 21.40 MHz ดังรูปที่7โดยจะมีค่าความไว ที่ -48 dBm



รูปที่ 6 สัญญาณสเปกตรัมเมื่อป้อนอินพุตบังคับ แท่งสเปกตรัมที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของรูป คือ สเปกตรัมของโลคอลออสซิลเลเตอร์ที่ความถี่ 660MHz แท่งสเปกตรัมที่อยู่ทางด้านขวามือของรูป คือ สเปกตรัมของสัญญาณอินพุตที่ความถี่ 681.40 MHz



รูปที่ 7 สัญญาณจากการย้ายย่านความถี่ลงมา

4. สรุปและวิจารณ์

ในบทความนี้ได้นำเสนอหลักการย้ายย่านความถี่ลงด้วยเทคนิคการป้อนอินพุตบังคับให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณอันดับสองบนพื้นฐานการแบ่งแยกตัวแปรทางเวลา โดยอินพุตบังคับที่ป้อนให้กับวงจรกำเนิดสัญญาณคือสัญญาณตั้งต้นที่ต้องการย้ายย่านความถี่ลงมาทำให้สามารถย้ายย่านความถี่ลงมาได้ภายในวงจรกำเนิดสัญญาณเพียงวงจรเดียว โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยวงจรคูณสัญญาณเพิ่มเติม อีกทั้งยังสามารถลดขนาดของวงจรรวมได้อีกนัยหนึ่งด้วย จากการวิเคราะห์และผลการทดลองที่ได้นำเสนอทำให้สามารถยืนยันได้ว่าเทคนิคนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้งวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่สูงและความถี่ต่ำ โดยสามารถเลือกสัญญาณที่ถูกย้ายย่านความถี่ลงมาแล้วได้ด้วยวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารอ้างอิง

[1] S.S. Haykin, Communication Systems, Newnan GA, United States, John Wiley & Sons, 1995.

[2] L.W. Couch, Digital and analog communication systems, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2001.

[3] T. Maneechukate, J. Koseeyaporn, P.Wardkein, P. Koseeyaporn, "Wide-band amplitude control of the second-order oscillator circuit," Int. J. Electronics and Communications, vol. 62 (9), pp. 666-673, Oct. 2008.

[4] T. Maneechukate, T. Tuwanut, P. Koseeyaporn, P.Wardkein, "New analytic solution of second-order oscillator using multi-time variables technique," Intelligent Signal Processing and Communication Systems, pp. 637-640, 13-16 December 2005.

[5] V. Loetwatsana, R. Phanchalad, P. Wardkein, "Amplitude Modulation Using Forced Function excite to Oscillator Circuit," EECON-29, pp. 669-672, 9-10 November 2006 (Thai).

[6] K. Kittipute, J. Koseeyaporn, P. Wardkein, "Amplitude Demodulation Based on Time-Varying Forced Input of Second-Order Oscillator Circuit," TENCON 2009 IEEE Region 10 Conference, pp. 1-4, 23-26 January 2009.

[7] M.M. Radmanesh, Radio frequency and microwave electronics illustrated, California State University, Northridge, Prentice Hall PTR, 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	**นายสุรเชษฐ์ ภาณุพัฒนา**
วัน เดือน ปีเกิด	27 มิถุนายน 2533
ที่อยู่	97/252 หมู่บ้านเพอร์เฟคเพลส-สุขุมวิท77 ถ.อ่อนนุช-ลาดกระบัง ต.ราชาเทวะ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540
ประวัติการศึกษา	2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่สูง 2.) ระบบโครงข่ายการสื่อสารไร้สาย 3.) การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยทฤษฎีสัญญาณและระบบ

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ. 2554-ปัจจุบัน	ตำแหน่ง วิศวกรสื่อสาร (Engineer) บริษัท ทรู คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) วางระบบ แก้ไขปัญหาและติดตั้งอุปกรณ์ชุมสายในโครงข่าย 3G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้