ปีการศึกษา 2532

เครื่องส่ง เอฟ เอ็ม สเตอริโอ

โดย

กำพล อุณหกาญจน์กิจ

สมชัย หวังวิบูลย์ชัย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ประดิษฐ์ วัชรพิบูลย์

22 พ.ย. 2535

027009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2532

ภาควิชา **เทคนิคอุตสาหกรรม**

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

เรื่อง **เครื่องส่ง เอฟ-เอ็ม สเตอริโอ**

ผู้จัดทำ

1. นาย กำพล อุณหกาญจน์กิจ
2. นาย สมชัย หวังวิบูลย์ชัย

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(.....)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(.....)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(.....)

027009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องส่ง เอฟ-เอ็ม สเตอริโอ

นาย กำพล อุณหกาญจน์กิจ
นาย สมชัย หวังวิบูลย์ชัย
อ.ประดิษฐ์ วัชรพิบูลย์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2532

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นแนวทางอย่างง่ายๆ ของการสร้างเครื่องส่งระบบเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ โดยที่สัญญาณสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์จะต้องประกอบด้วย สัญญาณ (L + R), สัญญาณไพล็อต, สัญญาณ (L - R)ซับแคร์เรียร์ ทั้งสามสัญญาณนี้รวมเรียกว่า สัญญาณคอมโพสิต เมื่อส่งสัญญาณนี้ออกอากาศแล้วเครื่องรับเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ จะรับสัญญาณนี้และทำการแยกสัญญาณออกเป็นสัญญาณทางซีกซ้าย, สัญญาณซีกขวา และสัญญาณไพล็อต ในเครื่องส่งเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ นี้จะต้องประกอบไปด้วยวงจรต่างๆ เช่น วงจรออสซิเลเตอร์, วงจรบาลานซ์มอดดูเลเตอร์, วงจรโวลทเตจ คอนโทรล ออสซิเลเตอร์ (VCO), วงจรสเตอริโอ เมทริก แอมปลิฟลาย, วงจรฟรีเควนซีมัลติพลาย เป็นต้น ซึ่งเราสามารถอธิบายหลักการของเครื่องส่งเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ ได้ด้วยวงจรเหล่านี้ กล่าวคือ เมื่อเราป้อนสัญญาณซีกซ้ายและขวาไปยังวงจรสเตริโอ เมทริก แอมปลิฟลาย จะทำให้เกิดสัญญาณผลต่างของสัญญาณซีกซ้ายและซีกขวา (L - R) และสัญญาณผลรวม (L + R) แล้วป้อนสัญญาณผลต่าง (L - R) เข้าวงจรบาลานซ์มอดดูเลเตอร์เพื่อผสมสัญญาณกับความถี่ 38 KHz ซึ่งผลิตมาจากวงจรออสซิเลเตอร์ สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณ(L - R)ซับแคร์เรียร์ และความถี่ 38 KHz จะถูกหาร 2 ให้เหลือเป็นความถี่ 19 KHz เป็นสัญญาณไพล็อต สัญญาณทั้งสามนี้จะถูกป้อนไปให้วงจรผลรวมเอ้าท์พุทของวงจรนี้เรียกว่า สัญญาณคอมโพสิค มัลติเพล็กซ์ และสัญญาณนี้จะถูกส่งไปให้วงจร VCO เพื่อทำให้เกิดฟรีเควนซีความถี่หนึ่งซึ่งความถี่นี้จะมีค่าไม่สูงมาก และนำไปผ่านวงจรทวีความถี่เพื่อให้ได้ความถี่ในย่านการกระจายเสียงระบบเอฟ-เอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง		หน้า
บทที่ 1	หลักการส่งวิทยุกระจายเสียง FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์	1
บทที่ 2	ทฤษฎี	22
บทที่ 3	การทำงานของเครื่องส่ง FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์	52
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง	65
บทที่ 5	วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง	72
ภาคผนวก		73
กิตติกรรมประกาศ		105
หนังสืออ้างอิง		106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F.M. STEREO TRANSMITTER

Kompol Unhakanjnkij
Somchai wangvibooncha i
Mr.Pradit Vacharpibul Advisor
1989

Abstract

This thesis is simple concept for making the F.M.stereo multiplex transmitter which this stereo multiplex signal. It is consist of (L+R) signal, (L-R) subcarrier signal and pilot signal. All signal we are called composite multiplex signal. When transmitted signal the F.M. receiver can separated compo site multiplex signal to left signal, right signal and pilot signal. In the F.M. stereo multiplex transmitter consist of other circuit such as oscillator circuit, stereo matrix ampli fy circuit, balance modulator circuit, VCO circuit, frequency multiple circuit, etc. We can describe above principlees of F.M. stereo multiplex transmitter with other circuit such as when we fed input left signal and right signal to stereo matrix amplify circuit. They will making difference signal to (L-R) signal and (L+R) signal. The (L-R) signal modulated with 38 KHz subcarrier, whose sideband product are transmit ted along with the main audio oscillator circuit is generated frequency 38 KHz. The 38 KHz subcarrier is necessary for reception of the (L-R) signal, so it must be supplied in some way at the stereo F.M. receiver. It is reconstructed in the receiver by using a 19 KHz pilot signal represents 10 % of the full modulation amplitude. The (L+R) signal, (L-R) sub-carrier signal, and the 19 KHz pilot signal are fed to a summing amplifier whose output is a composite multiplex signal that is fed to a voltage controlled oscillator generated particular frequency and send to frequency multiple circuit so that it can transmitted in F.M. broadcast band.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
หลักการส่งวิทยุกระจายเสียงเอฟ - เอ็ม สเตอริโอมัลติเพลกซ์

การส่งกระจายเสียงระบบ เอฟ-เอ็ม สเตอริโอมัลติเพล็กซ์ (FM STEREO MULTIPLEX) เป็นระบบที่คิดค้นหลังจากระบบกระจายแบบอื่น ๆ การส่งกระจายเสียงแบบนี้เกิดขึ้นหลังจากมีการส่งโทรทัศน์เสียอีก

เมื่อประมาณ พ.ศ. 2460 เศษ ๆ ซึ่งเป็นเวลาที่ใกล้เคียงกับที่มีการส่งกระจายเสียงระบบ AM นายอาร์มสตรอง (Armstrong) ได้คิดค้นการกระจายเสียงระบบ FM ขึ้นเป็นผลสำเร็จ

ต่อมาราว พ.ศ. 2490 เศษๆ ได้มีผู้พยายามส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอในหลายประเทศมีการทดลองส่งกระจายเสียงแบบสเตอริโอ โดยใช้ความถี่ 2 ความถี่ในการส่งโดยใช้ความถี่หนึ่งส่งกระจายเสียงสัญญาณซีกขวา อีกความถี่หนึ่งส่งกระจายเสียงสัญญาณซีกซ้าย มีการทดลองทั้งระบบ AM และ FM แต่มีปัญหาคือความสิ้นเปลือง เพราะถ้ามีการส่งหลายความถี่ ทางผู้ฟังก็ต้องใช้เครื่องรับหลายเครื่องตามไปด้วย

ในประเทศไทย สถานีวิทยุทหารเรือก็เคยทดลองส่งกระจายเสียงแบบสเตอริโอ โดยใช้ความถี่ 2 ความถี่ ในระบบ AM

ได้มีการคิดค้นการส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอ โดยใช้ความถี่เดียวในการส่งขึ้น โดยอาร์มสตรองและคณะอาจารย์ของมหาวิทยาลัยโคลัมเบียแห่งสหรัฐฯ เป็นผู้เริ่มต้นที่สโมสรวิทยุแห่งอเมริกา (RADIO CLUB OF AMERICA) เรียกระบบนี้ว่า สเตอริโอมัลติเพล็กซ์

ความหมายของระบบสเตอริโอ มัลติเพลกซ์

สเตอริโอ (STEREO) หมายถึง ระบบที่สามารถแยกทิศทางของเสียงได้ เมื่อเป็นการจำลองมิติให้คล้ายกับการฟังจากของจริง เมื่อเราฟังดนตรีจากระบบสเตอริโอ 2 ทิศทาง (2 CHANNEL) จะสามารถแยกตำแหน่งของเครื่องดนตรีชิ้นนั้น ๆ มาจากทิศทางใด ซ้ายขวาหรือกึ่งกลาง แต่สำหรับระบบสเตอริโอ 4 ทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4 CHANNEL) แล้ว เราจะได้มิติของเสียงเพิ่มขึ้นสามารถแยกตำแหน่งของทิศทางได้รอบตัว ทำให้เพิ่มรสชาติของการฟังได้มากยิ่งขึ้น

มัลติเพล็กซ์ (MULTIPLEX) หมายถึง การส่งสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณรวมกันมา เป็นการผสมสัญญาณต่าง ๆ ลงบนคลื่นพาห์อันเดียวกัน แล้วส่งไป พอถึงปลายทางด้านเครื่องรับก็ใช้วิธีการแยกสัญญาณต่าง ๆ ออกมาตามต้องการ เปรียบเทียบได้กับเราเอาสิ่งของหลาย ๆ อย่างใส่หีบห่อเดียวกันแล้วส่งไปยังปลายทาง เมื่อถึงจุดหมายเราก็แก้หีบห่อแยกเอาสิ่งของเหล่านั้นออกมาใช้งานตามความประสงค์

ฉะนั้นการส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอ จึงหมายถึง การนำสัญญาณเสียงซีกซ้าย (L) และสัญญาณซีกขวา (R) มัลติเพล็กซ์รวมๆ กันไปกับคลื่นพาห์ส่งกระจายคลื่นไปยังเครื่องรับ ทางเครื่องรับจะมีขบวนการแยกเอาสัญญาณ L และ R ออกมาจากคลื่นพาห์อีกครั้ง

การมัลติเพล็กซ์สัญญาณ แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. ไทม์ ดิวิชั่น มัลติเพล็กซ์ (TIME DIVISION MULTIPLEX) เป็นการส่งสัญญาณต่าง ๆ รวมกันมาตามลำดับของเวลา เช่น การส่งสัญญาณภาพของโทรทัศน์ขาวดำธรรมดา เมื่อส่งสัญญาณไปหนึ่งเส้นก็สอดด้วยสัญญาณอื่น ๆ แล้วเริ่มต้นใหม่

2. ฟรีเควนซี่ ดิวิชั่น มัลติเพล็กซ์ (FREQUENCY DIVISION MULTIPLEX) เป็นการส่งสัญญาณต่าง ๆ รวมกันมาในเวลาเดียวกัน ไม่เรียงตามลำดับเวลา ในการส่งสัญญาณโทรทัศน์สีก็ใช้การมัลติเพล็กซ์แบบนี้ร่วมด้วย เพราะสัญญาณสีเกาะมาพร้อมกับสัญญาณขาว-ดำในเวลาเดียวกัน ในการส่งกระจายเสียงระบบเอฟ-เอ็มสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์แบบนี้ด้วยเช่นกัน

ตัวอย่างการพัฒนาของการส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์

1. ระบบสเตอริโอ โซนิก (STEREO SONIC SYSTEM) ผู้คิดค้นระบบนี้ คือ วิลเลียม ฮอลสเตด (WILLIAM HALSTEAD) และเมอเรย์ ครอสบี้ (MURRAY CROSBY) ได้เริ่มทดลองเมื่อปี พ.ศ.2491 ระบบนี้เป็นระบบในยุคแรก ๆ ของการส่งกระจายเสียงแบบสเตอริโอ มัลติเพลกซ์ ที่ใช้ความถี่เดียวในการกระจายเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปรับปรุงจากสถานีวิทยุกระจายเสียง FM ธรรมดา ซึ่งส่งด้วยคลื่นความถี่ 97.9 MHz ส่งสัญญาณสเตอริโอด้วยการใช้คลื่นพาห์ย่อย (SUBCARRIER) ความถี่ 35 KHz ผสม (MULTIPLEX) เข้ากับความถี่หลัก 97.9 MHz ในการส่งแบบนี้ทำให้ไม่เปลืองความถี่บนหน้าปัดของเครื่องรับวิทยุ เนื่องจากส่งด้วยความถี่หลักเพียงความถี่เดียวเท่านั้น สัญญาณคลื่นพาห์ย่อยความถี่ 35 KHz นั้น นับว่าน้อยมากเทียบกับความถี่หลัก 97.9 MHz ขอให้สังเกตว่า ความถี่เสียงที่หูมนุษย์ได้ยินจะอยู่ในระหว่าง 20 Hz ถึง 20 KHz ความถี่ 35 KHz นั้นสูงกว่าความถี่ที่หูมนุษย์ได้ยินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ความถี่ 35 KHz นี้ ยังไม่จัดว่าเป็นคลื่น RF ในสเปรคตรัมของคลื่นวิทยุ ความจริงแล้วจัดอยู่ในช่วงความถี่เหนือเสียงที่เรียกว่า โซนิก หรือ ซุปเปอร์ โซนิก (SUPER SONIC) เท่านั้น

ระบบสเตอริโอชนิดนี้มีข้อบกพร่อง คือ ส่งได้ความถี่กว้างเพียง 8 KHz เท่านั้น เสียงที่หูมนุษย์ได้ยินเริ่มที่ 20 Hz จนถึง 20 KHz ซึ่งมีช่วงความถี่กว้างถึง 20,000 - 20 = 19,980 Hz หรือประมาณ 20 KHz นั่นเอง นับว่าสูงกว่า 8 KHz เกือบสามเท่าตัว ฉะนั้นเสียงสเตอริโอที่ได้จากระบบนี้จึงเป็นเสียงที่ขาดความไพเราะ ไม่มีความเป็นไฮ-ไฟ (HI-FI) และเนื่องจากความถี่ที่ได้อยู่ในช่วงแคบ เมื่อเร่งเครื่องให้เสียงดัง ก็จะมีเสียงกวนตามมา แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้ก็นับว่า เป็นความก้าวหน้าขึ้นมาอีกหนึ่งขั้น คือ ทำให้ส่งสัญญาณสเตอริโอแบบมัลติเพล็กซ์ได้

2. ระบบผลบวก ผลต่าง (SUM AND DIFFERENCE SYSTEM) เมื่อ วิลเลียม ฮอลสเตด และเมอเรย์ ครอสบี้ ได้ร่วมกันคิดค้นระบบสเตอริโอ โซนิกขึ้น แต่ไม่สามารถพัฒนาระบบให้ดีขึ้นได้ ทั้งสองจึงแยกกันค้นคว้าต่อ

ราวปี พ.ศ.2501 เมอเรย์ ครอสบี้ ได้คิดค้นระบบผลบวก ผลต่างขึ้น โดยเอาสัญญาณซีกซ้ายรวมกับสัญญาณซีกขวา เป็นสัญญาณ (L+R) เอาสัญญาณ (L+R) นี้ผสมกับคลื่นพาห์หลัก และได้เอาสัญญาณซีกซ้ายลบสัญญาณซีกขวา เป็นสัญญาณ (L-R) เอาสัญญาณ (L-R) นี้ผสมเข้ากับคลื่นพาห์ย่อย จากนั้นจึงนำสัญญาณคลื่นพาห์หลักที่มีสัญญาณ (L+R) มามัลติเพล็กซ์เข้ากับคลื่นพาห์ย่อยที่มีสัญญาณ (L+R) เข้ากันอีกที การทำเช่นนี้ทำให้ได้ช่วงความถี่เสียงที่ได้กว้างขึ้นถึง 15 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบวิทยุกระจายเสียง FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ มีหลายระบบ แต่ที่ FCC. ได้คัดเลือกเอาระบบสัญญาณไพล็อตโทน (PILOT TONE SIGNAL) นั้น พิจารณาจากหลักใหญ่ 2 ประการ คือ

1. ระบบสัญญาณไพล็อต โทน เป็นระบบประหยัด ใช้ความถี่เดียว ในการกระจายเสียง

2. เป็นระบบที่เครื่องรับ FM ธรรมดา สามารถรับฟังสัญญาณได้ดังเดิม โดยไม่ต้องดัดแปลงแก้ไขแต่อย่างใด

ตามที่กล่าวมานี้ มิได้หมายความว่า ระบบสัญญาณไพล็อต โทนจะเป็นระบบที่ดีที่สุดในการส่งกระจายเสียงแบบ เอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ แต่เป็นระบบที่เหมาะสมที่สุดของสิ่งแวดล้อมในสหรัฐอเมริกาขณะนั้น

แนวความคิดในการส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์

ในระบบสเตอริโอของเครื่องขยายเสียงที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้ ในรูปที่ 1 จะแสดงระบบสเตอริโอของเครื่องขยายเสียง จะเห็นว่ามีตัวรับสัญญาณเสียงอยู่ 2 ชุด คือ ไมค์รับสัญญาณเสียงทางซีกซ้าย และ ไมค์รับสัญญาณเสียงทางซีกขวา สัญญาณเสียงจากไมโครโฟนทั้งสองจะถูกส่งไปยังเครื่องขยายเสียงซึ่งแยกเป็นซ้าย-ขวาด้วยเช่นกัน และในที่สุดสัญญาณจากไมค์ซีกซ้ายจะถูกขยายออกสู่ลำโพงซ้าย สัญญาณจากไมค์ซีกขวาจะถูกขยายออกสู่ลำโพงขวา โดยมีผู้รับฟังอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างลำโพงทั้งสองซึ่งเป็นจุดที่สามารถรับฟังเสียงที่มีความเป็นสเตอริโอมากที่สุด หรือเป็นตำแหน่งที่ผู้ฟังสามารถแยกทิศทางของเสียงได้ดีที่สุด

ส่วนในรูปที่ 2 เป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงการส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอ โดยใช้เครื่องส่ง 2 ชุด ในการส่งสัญญาณซีกซ้ายและซีกขวา ในระบบนี้ความถี่ของเครื่องส่งทั้งสองจะต้องใช้คนละความถี่ และทำนองเดียวกันทางด้านการรับก็ต้องใช้เครื่องรับสองชุด จะเห็นว่าระบบนี้เป็นระบบที่สิ้นเปลืองอุปกรณ์ และสิ้นเปลืองย่านความถี่ (เพราะต้องใช้สองความถี่) การปรับเครื่องให้สมดุลย์ก็ยุ่งยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเสียงไฮ-ไฟ ที่ใกล้เคียงเสียงธรรมชาติได้

3. ระบบเฟนโทดายน์ (PHANTODYNE SYSTEM) หรือที่เรียกว่าระบบเงา เป็นระบบที่วิลเลียม ฮอลสเตดแยกมาค้นคว้าด้วยตัวเอง ในระบบนี้ฮอลสเตดได้ใช้คลื่นพาห์ย่อย 2 ความถี่ คือ 67 KHz และ 41 KHz

4. ระบบไพล็อต โทน (PILOT TONE SYSTEM) ระบบนี้ใช้หลักการที่สำคัญ คือ ใช้ความถี่ 19 KHz มัลติเพล็กซ์เข้ากับสัญญาณคลื่นพาห์ด้วย เพื่อให้ความถี่ 19 KHz นี้ปรากฏทางด้านเครื่องรับ ควบคุมเครื่องรับทำงานตามเครื่องส่ง เราทราบกันดีแล้วว่าความถี่ 19 KHz นี้ ยังเป็นความถี่โทนเสียงอยู่ เพราะอยู่ในช่วงความถี่ 20 Hz - 20 KHz ซึ่งเป็นความถี่ที่หูมนุษย์เราสามารถรับฟังได้

ระบบไพล็อต โทน นี้เป็นระบบเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ ที่หลายประเทศใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ แต่อาจจะมีบางประเทศในยุโรป เช่น ประเทศรัสเซีย ที่ใช้ระบบโพลา ม็อดดูเลชั่น (POLAR MODALATION) ซึ่งเป็นระบบของตนเองโดยเฉพาะ

ความเป็นมาของระบบไพล็อต โทน

ในระยะเริ่มแรกที่สหรัฐอเมริกา ได้มีการเสนอระบบการส่งวิทยุกระจายเสียงสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ถึง 19 ระบบ เพื่อให้รัฐบาลคัดเลือกเข้าเป็นระบบของชาติ โดยได้รับความยินยอมจาก FCC. (FCC. อ่านว่า เอฟ.ซี.ซี. เป็นชื่อย่อของคณะกรรมการควบคุมการสื่อสารของสหรัฐอเมริกา ชื่อเต็ม คือ FEDERAL COMMUNICATION COMMISSION)

ในปี พ.ศ. 2502 ได้มีการคัดเลือกระบบต่าง ๆ ลงเหลือ 6 ระบบ เพื่อพิจารณาอีกครั้ง จนกระทั่งในปี พ.ศ.2504 ได้มีการยอมรับระบบของบริษัท จี อี (GE) และเซนิท เรดิโอ คอร์ปอเรชัน (ZENITH RADIO CORPORATION) โดยนำทั้งสองระบบมาปรับปรุงเป็นระบบเดียวกัน เรียกว่า **ระบบสัญญาณไพล็อต โทน (PILOT TONE SIGNAL)** ซึ่งทาง FCC. ได้รับรองและยอมรับเป็นระบบของสหรัฐอเมริกา (ปัจจุบันประเทศไทยใช้ระบบนี้ด้วย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งทางเครื่องรับ และเครื่องส่ง

ในรูปที่ 3 แสดงแนวความคิดที่พัฒนาขึ้นมาอีกขั้น โดยทางเครื่องส่งจะใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเสียงซีกซ้ายและซีกขวาเข้าด้วยกัน แล้วส่งเข้าไปม็อดกับคลื่นพาห์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศ โดยใช้การส่งในระบบ FM

ทางด้านเครื่องรับ จะรับคลื่นเอฟ-เอ็มเข้ามา แล้วทำการแยกสัญญาณซีกซ้าย (L) และขวา (R) ออกจากกัน จากนั้นก็ขยายเสียงออกสู่ลำโพงซ้ายและขวา

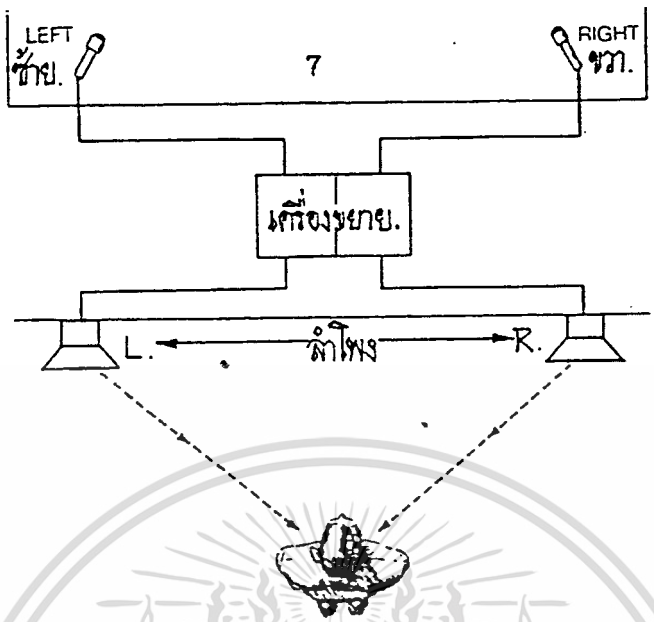
การมัลติเพล็กซ์สัญญาณเสียงซีกซ้ายและซีกขวา แล้วส่งไปกับคลื่นพาห์อันเดียวกันนั้น ต้องใช้วิธีการพิเศษที่ไม่ทำให้สัญญาณทั้งสองกวนกันได้ง่าย และการถอดแยกสัญญาณซ้าย-ขวา ทางด้านเครื่องรับจะต้องทำได้ดีโดยไม่ยุ่งยากมากนัก

ส่วนในรูปที่ 4 เป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงหลักการส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอ ที่มีการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเสียงซีกซ้าย และขวา เข้าด้วยกันแล้วส่งไปกับคลื่นพาห์อันเดียวกัน

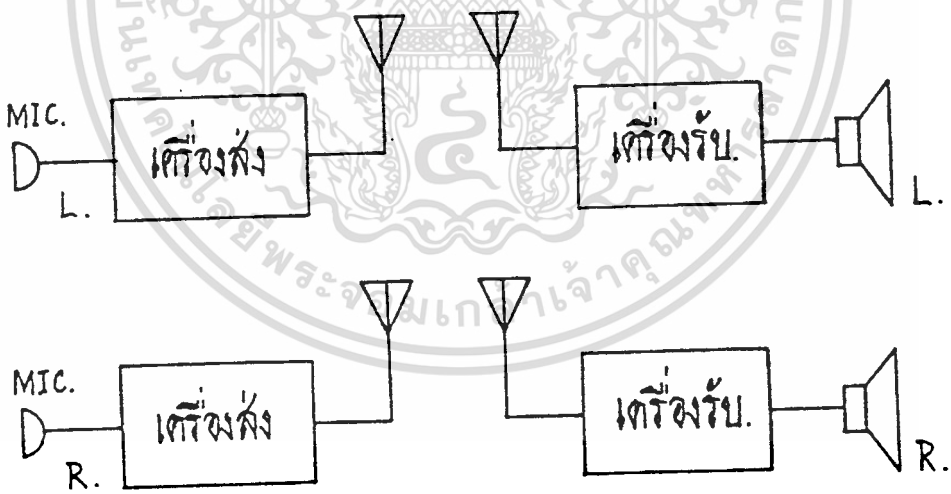
ด้านเครื่องส่ง ไมโครโฟน (L) จะรับสัญญาณเสียงซีกซ้ายแล้วส่งเข้าไปม็อดกับคลื่นพาห์ในเครื่องส่ง FM โดยตรง ส่วนไมโครโฟน (R) จะรับสัญญาณเสียงซีกขวาแล้วส่งเข้าไปม็อดกับความถี่ 38 KHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ได้จากวงจรออสซิเลเตอร์ ซึ่งกำเนิดความถี่ 38 KHz เป็นคลื่นพาห์ย่อย การม็อดสัญญาณเสียงซีกขวา (R) เข้ากับคลื่นพาห์ย่อย 38 KHz นั้นเราใช้วิธีการม็อดแบบ AM จากนั้นก็ทำการซัพเพรสคลื่นพาห์ย่อยออก (ผลจากการซัพเพรสคลื่นพาห์ย่อยออกจะทำให้มีเฉพาะสัญญาณเสียงที่ม็อดกับคลื่นพาห์ย่อยแล้วเท่านั้น ที่ปรากฏออกไปเป็นสัญญาณเอ้าท์พุทได้ ซึ่งในการม็อดสัญญาณทั่วๆไป จะมีสัญญาณคลื่นพาห์ปรากฏเป็นสัญญาณออกทางเอ้าท์พุทตลอดเวลาไม่ว่าจะมีสัญญาณเสียงเข้ามาม็อดหรือไม่ก็ตาม)

สัญญาณที่ถูกม็อดและกำจัดคลื่นพาห์ย่อยแล้วนี้ จะถูกส่งเข้าไปม็อดแบบ FM กับคลื่นพาห์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศอีกครั้ง (ม็อดรวมๆกันไปกับสัญญาณเสียงซีกซ้าย (L) ที่เข้ามาม็อดแบบ FM โดยตรง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



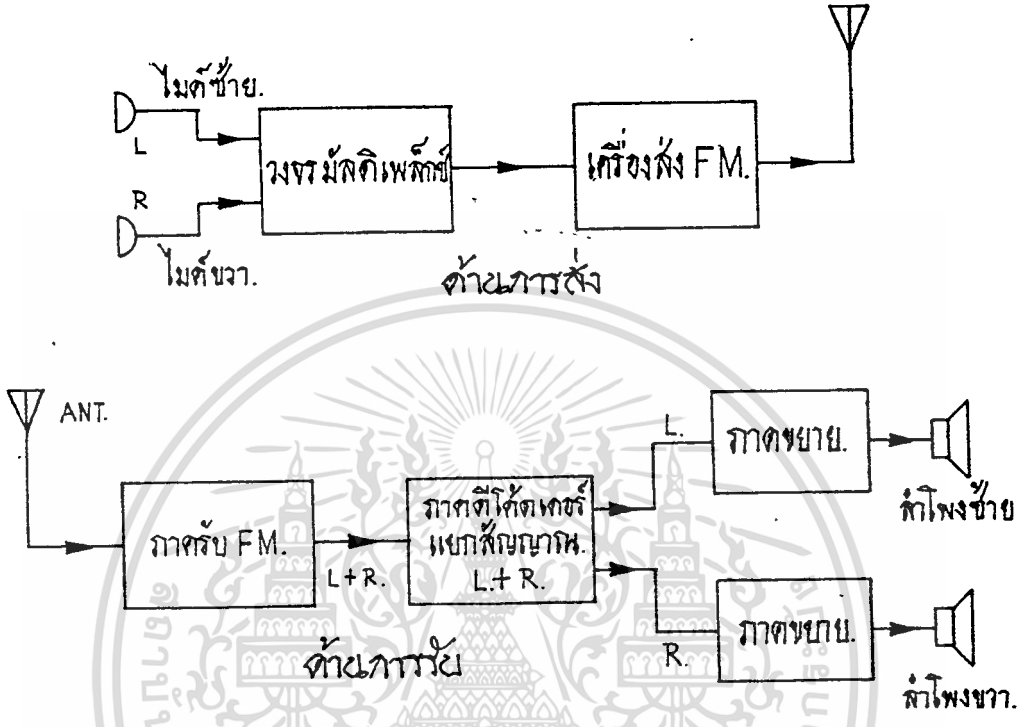
รูปที่ 1 แสดงระบบสเตอริโอของเครื่องขยายเสียง



ด้านเครื่องส่ง ด้านเครื่องรับ

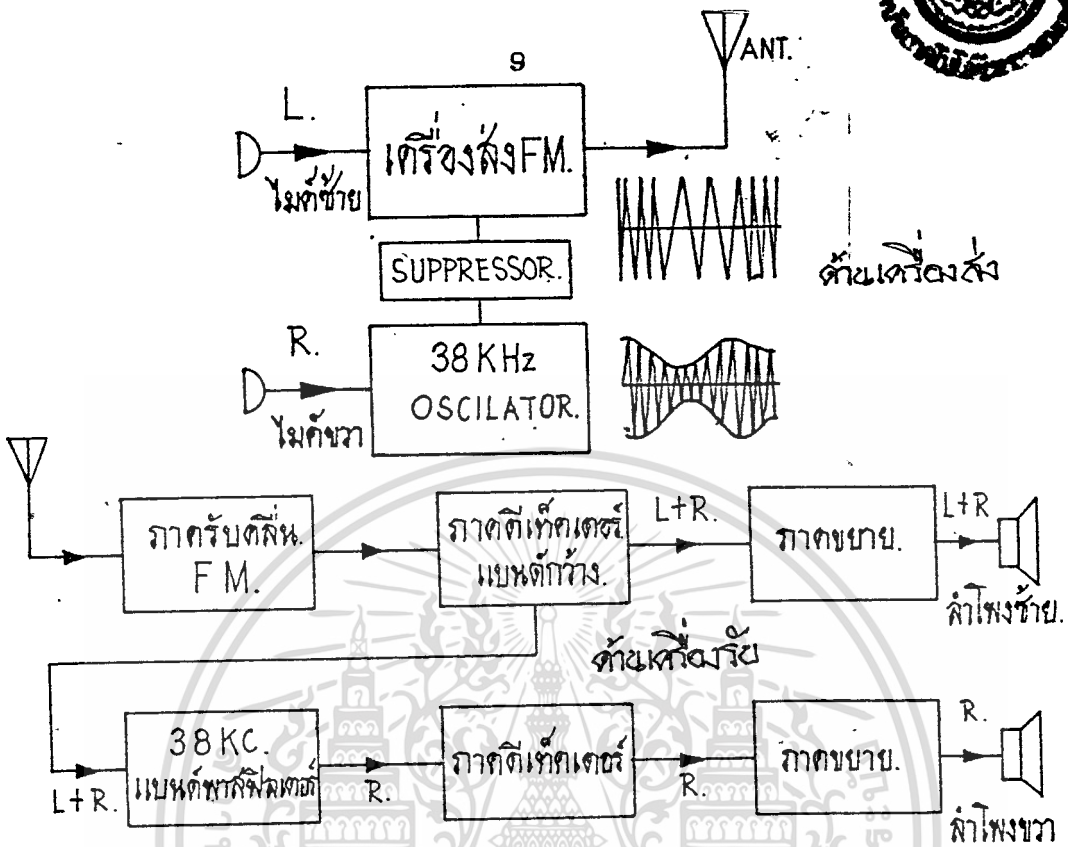
รูปที่ 2 แสดงระบบความคิดในการส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอ
โดยใช้เครื่องส่ง 2 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

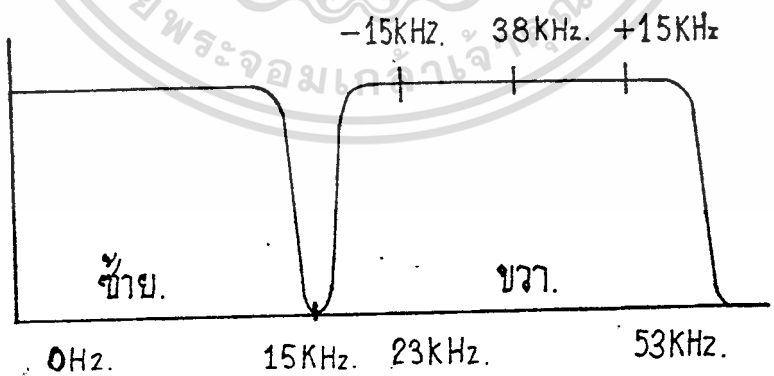


รูปที่ 3 แสดงแนวความคิดในการมัลติเพล็กซ์สัญญาณซ้าย-ขวา
เพื่อส่งไปกับคลื่นพาห์อันเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงหลักการส่งกระจายเสียงโดยมัลติเพล็กซ์สัญญาณซ้าย-ขวา ส่งไปกับคลื่นพาห์อันเดียวกัน



รูปแสดง สเปคตรัมของสัญญาณที่ส่งตามหลักการของรูปที่ 4

027009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการนี้เป็นการมัลติเพล็กซ์สัญญาณ L และ R เข้าด้วยกันแล้วส่งไปกับคลื่นพาห์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศเพียงความถี่เดียว โดยที่สัญญาณเสียง L และ R ไม่รบกวนกันเลย

สเปคตรัมของสัญญาณมัลติเพล็กซ์ เรากำหนดให้สัญญาณเสียงที่เข้ามาทางไมโครโฟนซีกซ้าย และซีกขวา มีความถี่ตั้งแต่ 0 Hz - 15 KHz ดังนั้น ไซด์แบนด์ของสัญญาณมัลติเพล็กซ์จึงแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกเริ่มจาก 0 Hz - 15 KHz เป็นไซด์แบนด์ที่เกิดจากสัญญาณเสียงซีกซ้าย (L) ส่วนอีกช่วงเป็นไซด์แบนด์ที่เกิดจากสัญญาณเสียงซีกขวา (R) ซึ่งม็อดกับคลื่นพาห์ย่อย 38 KHz ทำให้มีความถี่ด้านต่ำ 23 KHz(38 KHz - 15 KHz) และความถี่ด้านสูง 53 KHz(38 KHz + 15 KHz)

ด้านเครื่องรับ ภาครับจะรับสัญญาณ FM เข้ามา แล้วส่งไปให้วงจรดีเทคเตอร์ย่านกว้าง (Wideband detecter) ทำหน้าที่คืนรูปออกมาเป็นสัญญาณซีกซ้ายและซีกขวา สัญญาณเสียงนี้จะถูกส่งไปขยายเพื่อออกสู่ลำโพงซ้าย แต่เนื่องจากส่วนที่เป็นสัญญาณซีกขวามีความถี่อยู่ในช่วง 23 - 53 KHz เป็นความถี่เหนือเสียงที่มนุษย์ไม่อาจได้ยิน (ความถี่อยู่ในย่านโซนิคหรือซุปเปอร์โซนิค) ฉะนั้นผู้ฟังจึงไม่ได้ยินสัญญาณเสียงซีกขวาทางลำโพงซ้าย

สัญญาณเสียงซีกซ้าย (L) และซีกขวา (R) ที่ได้จากวงจรดีเทคเตอร์ย่านกว้าง ส่วนหนึ่งจะแยกไปเข้าวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ 38 KHz ที่วงจรนี้จะทำหน้าที่กรองความถี่ให้ผ่านเฉพาะความถี่ของสัญญาณเสียงซีกขวา (23 KHz-53 KHz) เพื่อส่งไปยังวงจรดีเท็คเตอร์ ดีเท็คซ้ำอีกครั้งให้คืนรูปออกมาเป็นสัญญาณเสียงซีกขวา ซึ่งมีความถี่ในช่วง 0 Hz - 15 KHz ส่งไปเข้าวงจรขยายเสียงออกสู่ลำโพงขวาต่อไป

วิธีการตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4 นี้ ทำให้เราสามารถส่งกระจายเสียงในระบบเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ได้ ด้านการรับก็สามารถแยกสัญญาณซ้าย-ขวาได้ดีโดยไม่กวนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ก็ยังเป็นระบบที่ไม่ดีพอ เพราะเครื่องรับเอฟ-เอ็มธรรมดายังไม่สามารถรับฟังคลื่นที่ส่งด้วยระบบนี้ได้อย่างสมบูรณ์ คือจะรับฟังได้เฉพาะสัญญาณเสียงซีกซ้ายเท่านั้น

ระบบการส่งกระจายเสียงแบบเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพลกซ์ ที่เหมาะสมและได้รับการรับเลือกให้ใช้เป็นมาตรฐานในการส่งกระจายเสียงที่ใช้กันในทุกวันนี้ มีสาระสำคัญที่ให้ผลดีในการใช้งาน ดังนี้

1. ส่งกระจายเสียงด้วยเครื่องส่งเครื่องเดียว และใช้คลื่นพาห์ความถี่เดียวในการส่งออกอากาศ โดยมีแบนด์วิธที่เข้ากันได้กับระบบ FM ธรรมดา

2. เป็นระบบเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ ที่สามารถให้เครื่องรับเอฟ-เอ็มแบบธรรมดาสามารถรับฟังสัญญาณได้ด้วย โดยเสียงที่รับฟังได้จะออกมาในแบบโมโนโฟนิค (ไม่มีการแยกทิศทางของเสียง) และไม่มีการรบกวนที่เกิดจากการกวนกันระหว่างสัญญาณ คุณภาพของเสียงที่ได้จะต้องสมบูรณ์ เหมือนการรับฟังจากสสถานีเอฟ-เอ็มธรรมดา โดยไม่ต้องมีการดัดแปลงแก้ไขเพิ่มเติมที่เครื่องรับแต่ประการใด

3. เครื่องรับเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์นั้น นอกจากจะรับคลื่นจากสถานีเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ ซึ่งทำให้สามารถแยกสัญญาณซ้าย-ขวาได้แล้ว จะต้องสามารถรับฟังจากสถานีวิทยุเอฟ-เอ็มธรรมดาได้ด้วย โดยเสียงที่รับฟังได้จะออกมาในแบบโมโนโฟนิค (ไม่มีการแยกทิศทางของเสียง)

4. เครื่องรับเอฟ-เอ็มธรรมดา ที่รับสัญญาณจากสถานีเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ ถ้าต้องการรับฟังเสียงที่เป็นระบบสเตอริโอก็สามารถทำได้โดยการแก้ไข ดัดแปลง หรือเพิ่มเติมอุปกรณ์บางอย่างเข้าไปในวงจรเครื่องรับเอฟ-เอ็มธรรมดา

หลักการส่งกระจายเสียงระบบเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ในปัจจุบัน

ในรูปที่ 5 เป็นบล็อคไดอะแกรมที่แสดงหลักการของเครื่องส่งกระจายเสียงระบบเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ที่ได้รับการอนุมัติจากสถาบัน FCC.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสหรัฐอเมริกา เป็นระบบที่ใช้กันแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับของนานาประเทศ (ปัจจุบันประเทศไทยใช้ระบบนี้)

หลักการทำงาน เริ่มต้นจากไมโครโฟนซ้าย (MIC.L) และไมโครโฟนขวา (MIC.R) จะรับสัญญาณเสียงเข้ามาขยายที่วงจรขยายเสียง แล้วต่างก็ส่งสัญญาณ L และ R ไปรวมกันเป็นสัญญาณ(L + R) (ที่ภาค L + R) สัญญาณ(L + R) ที่ได้ จะถูกส่งต่อไปยังภาคมัลติเพล็กซ์ เพื่อเตรียมมัลติเพล็กซ์รวมกับสัญญาณอื่นๆ

สัญญาณส่วนหนึ่งจากภาคขยายสัญญาณเสียง(R) จะถูกส่งไปที่ภาคอินเวอเตอร์ (INVERTER)ด้วย เพื่อกลับเฟสสัญญาณ(R)ไปจากเดิมอีก 180 องศา กลายเป็นสัญญาณ(-R) ส่งไปรวมกับสัญญาณที่มาจากภาคขยายสัญญาณเสียง(L) ที่ภาค(L - R) สัญญาณที่รวมกันนี้จะกลายเป็นสัญญาณ(L - R) ซึ่งจะส่งต่อไปยังภาคบาลานซ์ม็อดดูเลเตอร์(BALANCE MODULATOR)เพื่อม็อดดูเลทกับคลื่นพาห์ย่อย 38 KHz ที่เข้ามาอีกทาง

คลื่นพาห์ย่อย(SUBCARRIER) 38 KHz นั้นได้มาจากความถี่คลื่นซายน์ 19 KHz จากภาคออสซิลเลเตอร์ ซึ่งถูกส่งเข้าทวีคูณความถี่ขึ้นอีกสองเท่า(19 KHz * 2 = 38 KHz) ที่ภาคทวีคูณความถี่สองเท่า(FREQUENCY DOUBLER)

ความถี่ 38 KHz ที่ได้นี้จะถูกใช้เป็นคลื่นพาห์ย่อยเพื่อส่งไปม็อดกับสัญญานเสียง (L-R) ที่ภาคบาลานซ์ม็อดดูเลเทอร์

ภาคบาลานซ์ม็อดดูเลเทอร์นอกจากจะทำหน้าที่ม็อดสัญญานเสียง (L-R) เข้าทางส่วนสูงของสัญญานคลื่นพาห์ย่อยแล้ว (ม็อดแบบ AM) มันยังทำหน้าที่กำจัดคลื่นพาห์ย่อยไม่ให้ไปปรากฏออกไปเป็นสัญญานที่เอ้าท์พุทเพียงลำพังสัญญานเดียวอีกด้วย (สัญญานที่ม็อดรวมกันแล้วเท่านั้นที่ปรากฏออกไปเป็นสัญญานเอ้าท์พุทของภาคบาลานซ์ม็อดดูเลเทอร์)

เราเรียกสัญญาณที่ม็อดรวมกันระหว่างสัญญาณคลื่นพาห์ย่อย 38 KHz และสัญญาณเสียง (L-R) นี้ว่า สัญญาณคลื่นพาห์ย่อย L-R(L-R SUBCARRIER) และสัญญาณนี้จะถูกส่งไปยังภาคมัลติเพล็กซ์เพื่อมัลติเพล็กซ์รวมกันไปกับสัญญาณอื่นๆ

นอกจากนี้แล้วภาคออสซิเลเตอร์ยังแยกส่งความถี่ 19 KHz สำหรับเป็นสัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ญาณไพล็อตโทนไปยังภาคมัลติเพล็กซ์เพื่อมัลติเพล็กซ์สัญญาณ 19 KHz รวมไปกับสัญญาณอื่นๆ อีกด้วย

จะเห็นว่าที่ภาคมัลติเพล็กซ์จะเป็นที่รวมของสัญญาณต่างๆ คือ

1. สัญญาณเสียง (L+R) จากภาค L+R
2. สัญญาณ (L-R) ซัพแคเรียร์จากภาคบาลานซ์มอดดูเลเตอร์
3. สัญญาณไพล็อตโทน 19 KHz จากภาคออสซิเลเตอร์

สัญญาณทั้งสามนี้สามารถมัลติเพล็กซ์รวมเข้าด้วยกันได้โดยไม่มีการแทรกแซงสัญญาณต่อกันเพราะแต่ละสัญญานมีขอบเขตความถี่ที่ต่างกันนั่นเอง (ดูรูปที่ 6)

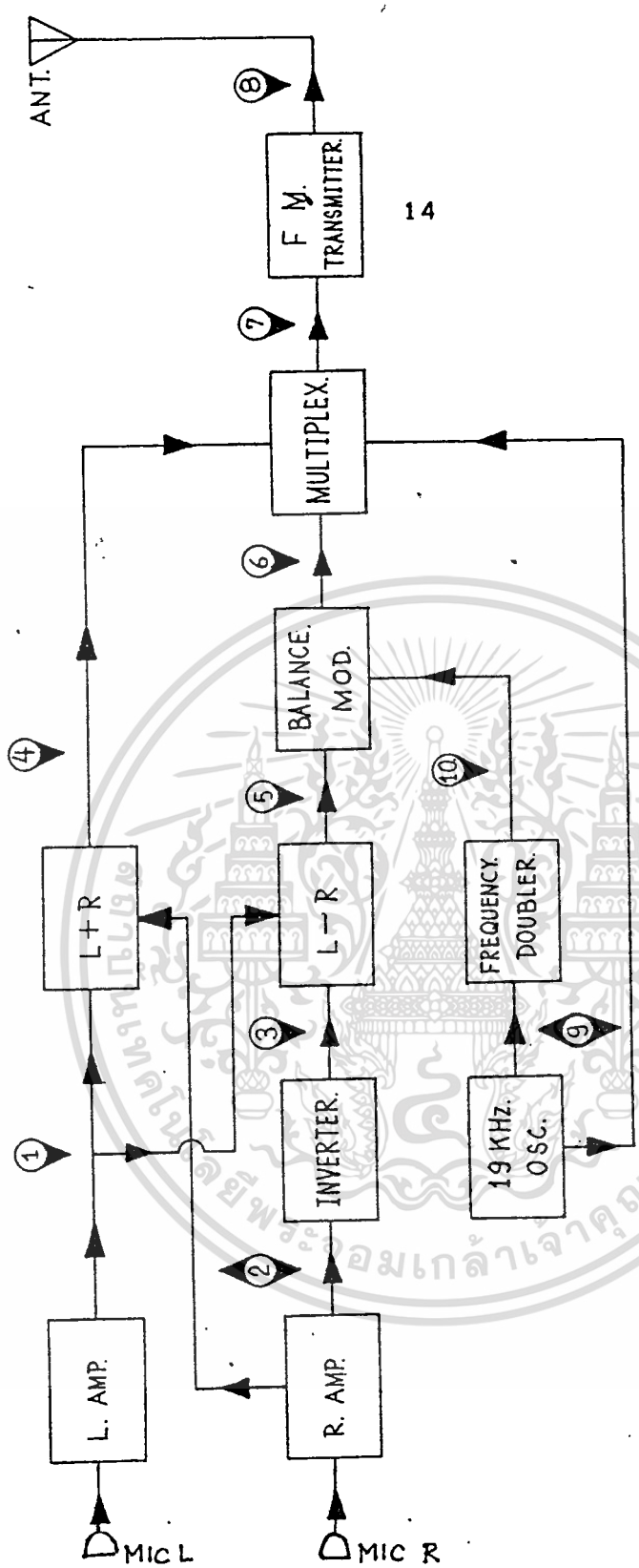
สัญญาณรวมมัลติเพล็กซ์จะถูกส่งไปม็อดกับคลื่นพาห์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศในระบบเอฟ-เอ็ม ในภาคส่งนี้ก็เหมือนกับเครื่องส่งเอฟ-เอ็มธรรมดาทั่วไปที่ใช้ส่งในย่านความถี่กระจายเสียง 88-108 MHz ที่มีการส่งสัญญาณต่างๆ ถึงสามสัญญาณออกไปยังเครื่องรับก็เพื่อจุดประสงค์ดังนี้

1. **สัญญาณ (L+R)** สัญญาณนี้เป็นผลรวมของสัญญาณเสียงซิกซ้ายและซิกขวาเป็นสัญญาณเสียงแบบโมโน ที่ต้องส่งสัญญาณนี้เข้าไปด้วยก็เพื่อใช้สำหรับการรับของเครื่องเอฟ-เอ็มธรรมดาให้รับฟังจากสถานีที่ส่งในระบบสเตริโอมัลติเพล็กซ์ได้ เครื่องรับเอฟ-เอ็มธรรมดาจะรับเอาเฉพาะสัญญาณนี้ไปเป็นสัญญาณเสียงออกสู่ลำโพง เสียงที่ได้จะมีครบทั้งสัญญาณซิกซ้ายและขวารวมกัน ไม่มีการแยกทิศทางของเสียงและคุณภาพเสียงจะเหมือนกับการรับฟังจากสถานีวิทยุเอฟ-เอ็มธรรมดาทั่วไป

2. **สัญญาณคลื่นพาห์ย่อย (L-R)** ที่ต้องเอาสัญญาณ (L-R) ไปม็อดกับคลื่นพาห์ย่อย 38 KHz ก่อนก็เพราะเราต้องการส่งสัญญาณ (L-R) รวมกันไปพร้อมๆ กับสัญญาณ (L+R) โดยไม่ต้องการให้สัญญาณทั้งสองมีการแทรกแซงกัน วิธีการนี้เป็นกลวิธีในการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเข้าด้วยกัน เปรียบเสมือนกับเราต้องการส่งน้ำมันเบนซินและน้ำมันก๊าดซึ่งต่างก็เป็นน้ำมันด้วยกันแต่ต่างชนิดกันไปยังจุดหมายปลายทาง โดยจำเป็นต้องใส่น้ำมันทั้งสองรวมกันไปในถังเดียวกัน

ถ้าเราทำโดยการเอาน้ำมันเบ็นซินใส่ลงไปในถังก่อน (ก็เหมือนกับเราเอาสัญญาณ (L+R) ม็อดกับคลื่นพาห์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศ) จากนั้นจึงหาขวดที่ขนาดเล็กกว่าถังมาบรรจุน้ำมันก๊าดและปิดฝาขวดให้แน่น (ทำนองเดียวกับที่เราเอาสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของเครื่องส่ง เอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ที่ใช้ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(L-R) มอดกับคลื่นพาห์ย่อย) แล้วเอาขวดน้ำมันก๊าดใส่ลงในถังน้ำมันเบ็นซินอีกที ด้วยวิธีนี้จะทำให้เราสามารถเอาน้ำมันเบ็นซินและน้ำมันก๊าดใส่ร่วมไปในถังเดียวกันได้โดยน้ำมันทั้งสองชนิดไม่ผสมปนกัน (เช่นเดียวกับสัญญาณ(L+R) และสัญญาณ (L-R) ซัพแคเรียร์จะไม่มีการแทรกแซงกัน) เมื่อส่งไปถึงปลายทางเพียงเรายกขวดน้ำมันก๊าดขึ้นก็สามารถแยกน้ำมันทั้งสองชนิดออกจากกันได้โดยง่าย

เราสามารถเอาสัญญาณเสียง (L-R) และ (L+R) ที่ส่งไปมาแปลงสภาพให้แยกเป็นสัญญาณเสียงซีกซ้ายและขวา (L และ R) ปรากฏทางด้านเครื่องรับได้โดยการนำสัญญาณทั้งสองมาบวกหรือลบกัน ซึ่งแสดงได้ด้วยพีชคณิตดังนี้

เมื่อนำสัญญาณ (L+R) และ (L-R) มาบวกกัน

$$\begin{array}{rl} & L+R \\ + & \underline{L-R} \\ \text{จะได้สัญญาณเสียงซีกซ้าย} = & 2L \end{array}$$

เมื่อนำสัญญาณ (L+R) และ (L-R) มาลบกัน

$$\begin{array}{rl} & L+R \\ - & \underline{L-R} \\ \text{จะได้สัญญาณเสียงซีกขวา} = & 2R \end{array}$$

3. สัญญาณไพล็อตโทน 19 KHz เนื่องจากสัญญาณเสียง (L-R) ที่ส่งมายังเครื่องรับเป็นสัญญาณเสียงที่มอดมากับคลื่นพาห์ย่อย 38 KHz ฉะนั้น ในการนำมาเสริมหรือหักล้างกับสัญญาณ (L+R) ในวงจรแยกสัญญาณสเตอริโอ (วงจรดีโค้ดเดอร์) เพื่อทำให้เกิดเป็นสัญญาณเสียงซีกซ้ายและขวาขึ้นนั้นจำเป็นต้องมีสัญญาณ 38 KHz ที่มีเฟสสัมพันธ์กัน (SYNCHRONIZ) กับคลื่นพาห์ย่อยที่มอดมากับสัญญาณ (L-R) เพื่อช่วยให้วงจรดีโค้ดเดอร์ทำงานแยกสัญญาณได้ จึงต้องมีการส่งสัญญาณไพล็อตโทน 19 KHz มาด้วย เพราะความถี่ 19 KHz เมื่อมาถึงเครื่องรับก็สามารถทำให้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 38 KHz ได้โดยง่าย ด้วยการใช้วงจรทวีคูณความถี่ขึ้นมาอีกสองเท่า และเนื่องจากความถี่ 19 KHz ซึ่งเป็นสัญญาณไพล็อตโทนนี้เป็นต้นกำเนิดของสัญญาณคลื่นพาห์ย่อยทางด้านเครื่องส่ง ความถี่ 38 KHzที่ได้จึงมีเฟสที่สัมพันธ์กับสัญญาณคลื่นพาห์ย่อย (L-R) ตลอดเวลา

รูปที่ 6 เป็นการแสดงรูปคลื่นตามจุดต่างๆ ของบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5 ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจการทำงานของเครื่องส่งเอฟเอ็มสเตอริโอมัลติเพล็กซ์ได้ดีขึ้น

เพื่อให้ง่ายจึงให้สัญญาณที่ป้อนเข้าทางไมค์ซ้ายและขวาเป็นสัญญาณโทนเสียงคลื่นรูปซายน์ โดยให้สัญญาณเสียง (L) มีความถี่สูงกว่าสัญญาณเสียง (R) ไปอีกเท่าตัวจะได้ไม่สับสนในการทำความเข้าใจ

หมายเลข 1 เป็นคลื่นความถี่เสียงรูปซายน์ที่ออกจากวงจรขยายสัญญาณเสียงซีกซ้าย (L)

หมายเลข 2 เป็นคลื่นความถี่เสียงรูปซายน์ที่ออกจากวงจรขยายสัญญาณเสียงซีกขวา (R)

หมายเลข 3 เป็นรูปคลื่นสัญญาณเสียง (R) ที่ผ่านวงจรอินเวิททิงแล้วกลายเป็นสัญญาณ (-R) สัญญาณที่ได้จะเป็นรูปซายน์อยู่เหมือนเดิม เพียงแต่จะมีเฟสต่างไปจากสัญญาณ (R) 180 องศาเท่านั้น

หมายเลข 4 เป็นรูปคลื่นที่เกิดจากการรวมกันระหว่างสัญญาณ L และ R เป็นสัญญาณ (L+R)

หมายเลข 5 เป็นรูปคลื่นที่เกิดจากการรวมกันระหว่างสัญญาณ (L) และสัญญาณ (-R) มาเป็นสัญญาณ (L-R)

หมายเลข 9 เป็นสัญญาณความถี่ 19 KHz ซึ่งใช้เป็นสัญญาณไพล็อตโทน

หมายเลข 10 เป็นสัญญาณความถี่ 38 KHz ซึ่งเกิดจากการนำสัญญาณ 19 KHz มาทวีความถี่ให้สูงขึ้นอีกเท่าตัว เพื่อใช้เป็นคลื่นพาห์ย่อยสำหรับม็อดกับสัญญาณ (L-R)

หมายเลข 6 เป็นสัญญาณที่เกิดจากสัญญาณเสียง (L-R) ม็อดเข้ากับสัญญาณคลื่นพาห์ย่อยแล้วถูกซัพเพรสไปด้วยในตัวกลายเป็นสัญญาณ (L-R) ซัพแคเรียร์

หมายเลข 7 เป็นสัญญาณที่มีมัลติเพล็กซ์รวมกันระหว่างสัญญาณ (L+R) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(L-R) ซัพแคเรียร์ (ในที่นี้ไม่ได้แสดงสัญญาณ 19 KHz ไว้)

หมายเลข 8 เป็นสัญญาณคลื่นพาห์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศ เพราะถูกม็อดในระบบเอฟ-เอ็ม ความถี่ของสัญญาณจึงเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณมัลติเพล็กซ์ที่เข้ามาม็อดด้วย

สัญญาณที่กำกับด้วย 2L ในรูปคลื่นหมายเลข 7 เป็นการแสดงให้เห็นผลบวกของสัญญาณ (L+R) และ (L-R) ผลลัพธ์ที่ได้เป็นสัญญาณเสียงซีกซ้ายหรือ (L+R)+(L-R) = 2L

สัญญาณที่กำกับด้วย 2R เป็นการแสดงให้เห็นผลลบของสัญญาณ (L+R) และ (L-R) ผลลัพธ์ที่ได้เป็นสัญญาณเสียงซีกขวาหรือ (L+R)-(L-R) = 2R

ในส่วนที่เป็นเส้นประไม่ใช่รูปคลื่นสัญญาณ แต่เป็นการแสดงให้เห็นผลเฉลี่ยของสัญญาณ L และสัญญาณ R และเส้นประที่เป็นผลเฉลี่ยนี้จะมีรูปร่างเหมือนสัญญาณ (L+R) เป็นการแฝงตัวสัญญาณ (L+R) ไปกับสัญญาณมัลติเพล็กซ์

การผสมสัญญาณหรือการรวมกันระหว่างสัญญาณทั้งสองที่ทำให้เกิดเป็นสัญญาณรูปร่างใหม่ขึ้น เช่น การรวมกันระหว่างสัญญาน (L) กับสัญญาน (R) แล้วทำให้เกิดเป็นรูปคลื่นสัญญาณ (L+R) ขึ้นนั้น ใช้หลักการเสริมหรือหักล้างกันระหว่างสัญญาณโดยใช้วิธีบวกลบกันธรรมดา จะเข้าใจได้ง่ายถ้าเราใช้สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมาแทนรูปคลื่นซายน์ ดังในรูปที่ 7

ตามรูปที่ 7 เป็นตัวอย่างการรวมสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมระหว่างสัญญาณ A และสัญญาณ B ผลลัพธ์ของการรวมจะทำให้เกิดเป็นรูปคลื่นสัญญาณ C

เราแบ่งสัญญาณออกเป็น 8 ลูกคลื่น ตามหมายเลขที่อยู่เหนือสัญญาณ A

ลูกคลื่นที่ 1 สัญญาณ A มีค่า = +1

สัญญาณ B มีค่า = +1

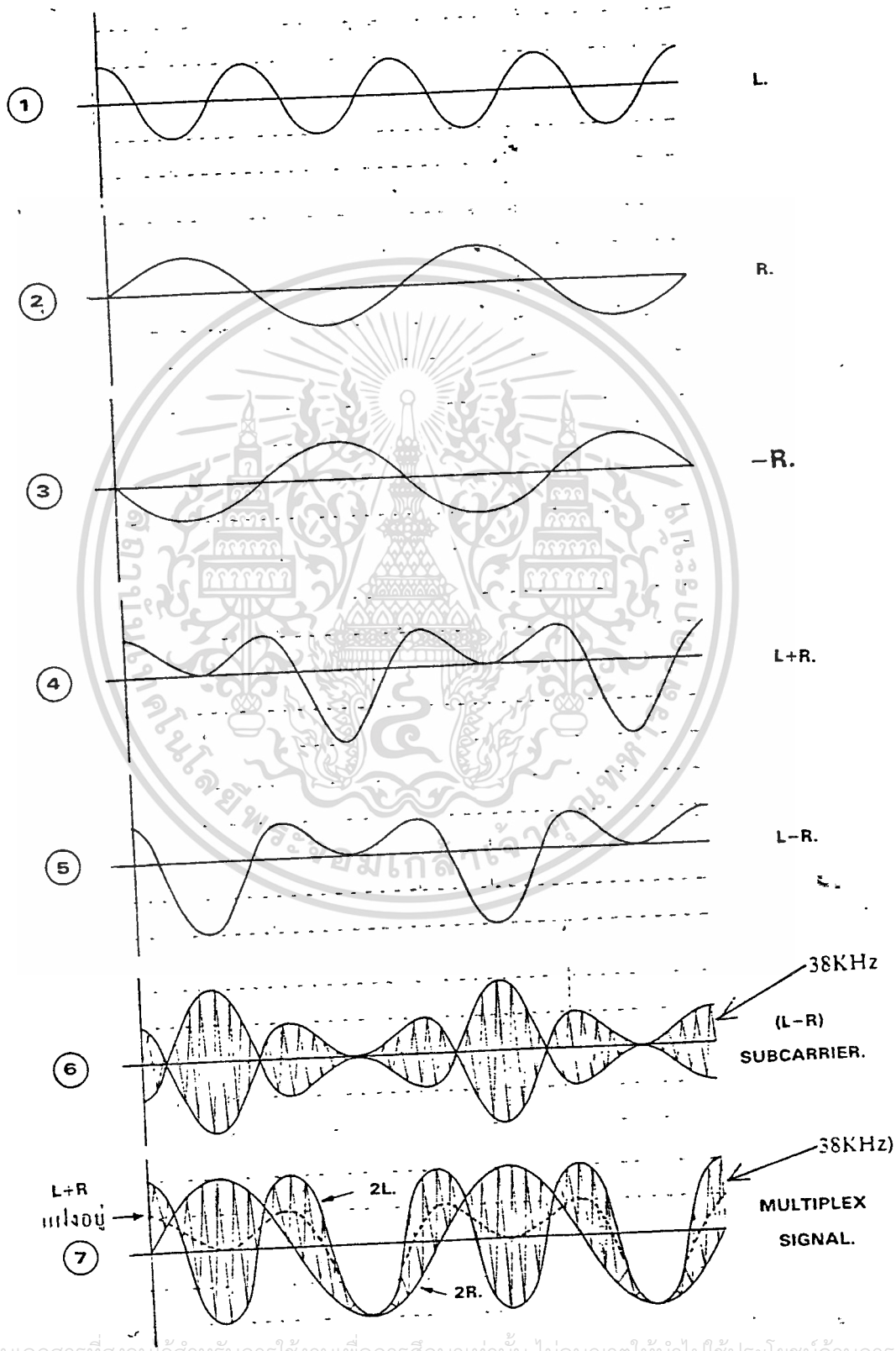
ฉะนั้น ผลลัพธ์ที่สัญญาณ C = 1+1 = 2

ลูกคลื่นที่ 2 สัญญาณ A = 0

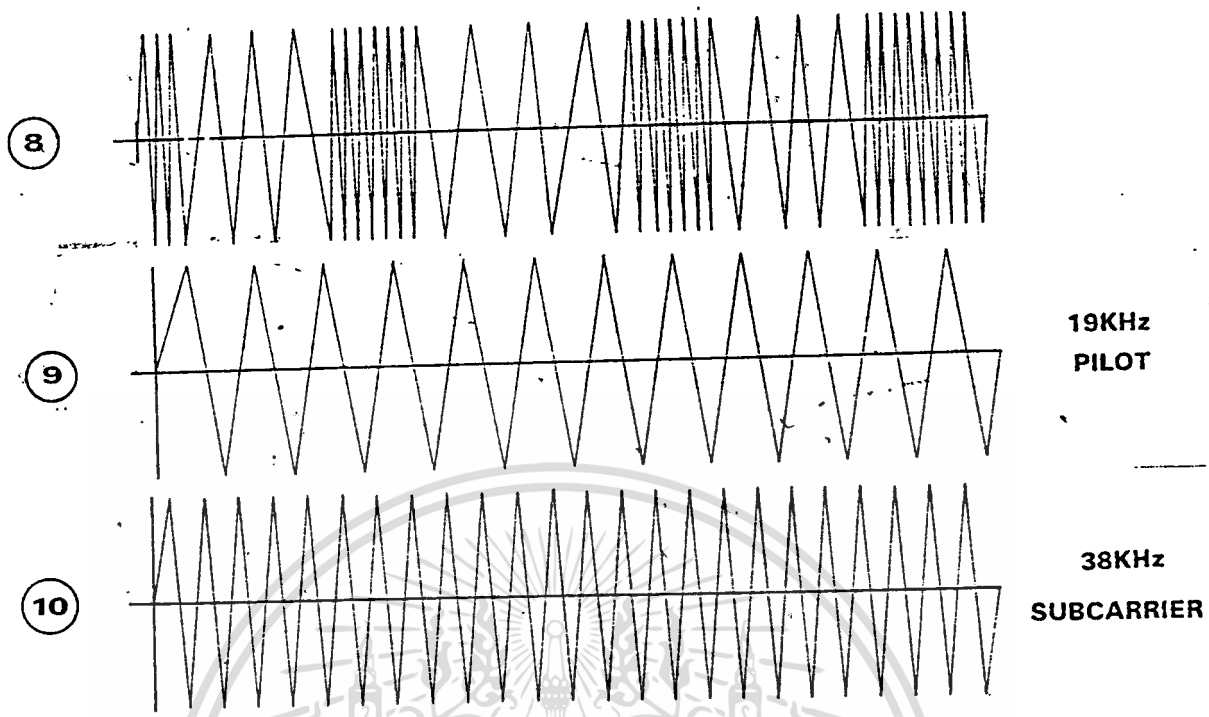
สัญญาณ B = -1

ฉะนั้น ผลลัพธ์ที่สัญญาณ C = 0-1 = -1

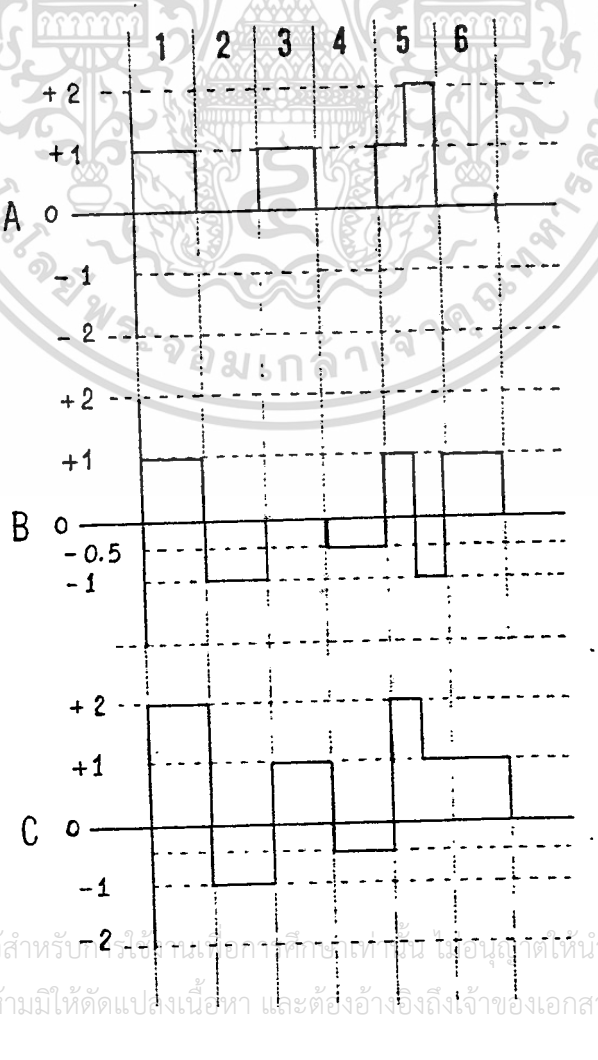
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 แสดงการรวมสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกคลื่นที่ 3 สัญญาณ A = +1
สัญญาณ B = 0
ฉะนั้น ผลลัพธ์ที่สัญญาณ C = 1+0 = 1

ลูกคลื่นที่ 4 สัญญาณ A = 0
สัญญาณ B = -0.5
ฉะนั้น ผลลัพธ์ที่สัญญาณ C = 0-0.5 = -0.5

ลูกคลื่นที่ 5 แบ่งลูกคลื่นออกเป็น 2 ช่วง
1. ช่วงครึ่งแรก
สัญญาณ A = +1
สัญญาณ B = +1
ฉะนั้นสัญญาณ C = 1+1 = 2
2. ช่วงครึ่งหลัง
สัญญาณ A = +2
สัญญาณ B = -1
ฉะนั้นสัญญาณ C = 2-1 = 1

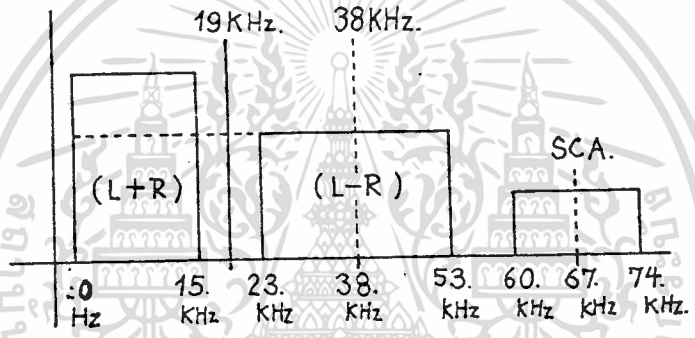
ลูกคลื่นที่ 6 สัญญาณ A = 0
สัญญาณ B = 1
ฉะนั้นสัญญาณ C = 0+1 = 1

ขอบเขตความถี่ของสัญญาณมัลติเพล็กซ์ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 8 แยกออกเป็นดังนี้
สัญญาณ (L+R) หรือ สัญญาณ M = 0 Hz - 15 KHz
สัญญาณไพล็อตโทน หรือ สัญญาณ P = 19 KHz
สัญญาณ (L-R)ซัพแคเรียร์ หรือ สัญญาณ S = 23 KHz - 53 KHz
สัญญาณไพล็อตโทน 19 KHz จะอยู่ระหว่างสัญญาณ (L+R) และ (L-R) ซัพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคเรียร์ โดยมีไซด์แบนด์ด้านสูงและต่ำข้างละ 4 KHz เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนกับสัญญาณอื่น

(แถบความถี่ช่วง 60-74 KHz เป็นของระบบ SCA ย่อมาจาก Subsidiary Communication Authorization)



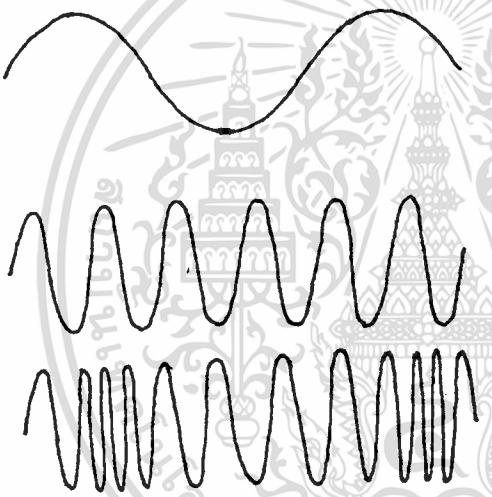
รูปที่ 8 แสดงขอบเขตความถี่ของสัญญาณมัลติเพล็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

F.M. SIDE BAND ANALYSYS

Frequency Modulation (FM) หมายถึงการเปลี่ยนความถี่ของคลื่นพาห์ตามสัดส่วนของขนาดของสัญญาณที่นำมา Mod และอัตราซึ่งกำหนดโดยความถี่ของแหล่งเกิดสัญญาณที่นำมา Mod โดยที่ขนาดของคลื่นพาห์ยังมีค่าคงที่ มีลักษณะดังรูปข้างนี้



f_m : modulating signal

f_c : carrier wave

FM : modulated wave

ถ้าให้คลื่นพาห์มีสมการเป็น

$$= E_c \sin \phi(t) \qquad \text{.....(1)}$$

โดย $\phi(t)$ = phase angle ของคลื่นซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (t) และ phase angle มีความสัมพันธ์กับ angular velocity(w) หรือความถี่ (f) ดังนี้

$$w = 2\pi f = d\phi(t)/dt \qquad \text{.....(2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการ Mod แบบ FM คลื่นเสียง (modulating signal) ซึ่งมีสมการเป็น

$$e_m = E_m \cos 2\pi f_m t \quad \text{.....(3)}$$

โดย f_c = เป็นความถี่ของคลื่นพาห์ ขณะยังไม่มีสัญญาณเข้ามา Mod

f_d = Freq. deviation.(มากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับ Amplitude ของAF)

แทนค่า (3) ใน (2) จะได้

$$d\phi(t)/dt = 2\pi(f_c + f_d \cos 2\pi f_m t) \text{...(4)}$$

$$\begin{aligned}\phi(t) &= \int 2\pi(f_c + f_d \cos 2\pi f_m t)\, dt \\ &= 2\pi f_c + (f_d/f_m) \sin 2\pi f_m t + \phi_o \\ &= w_c t + m_f \sin 2\pi f_m t + \phi_o \quad \text{.....(5)}\end{aligned}$$

ณ ที่นี้ $m_f = f_d/f_m$ = modulation index.

ϕ_o = มุมทางไฟฟ้า เมื่อ t = 0 เป็นค่าคงที่จากการ integral เพื่อความสะดวกจะตัดทิ้งไป

แทนค่า $\phi(t)$ ลงใน (1) จะได้

$$\begin{aligned}e_c &= E_c \sin (w_c t + m_f \sin w_m t) \\ &= e \quad \text{ซึ่ง Mod แล้ว}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frequency Spectrum ของคลื่น FM.

เพื่อจะหาค่า Spectrum เราจะกระจายสมการของคลื่น FM นี้ออกเป็น

$$e = E_c \sin w_c t \cos(m_f \sin w_m t) + \cos w_c t \sin(m_f \sin w_m t)$$

จากสมการ Bessel function .....(7)

$$\cos(m_f \sin w_m t) = J_0(m_f) + 2 \Sigma J_{2n}(m_f)\cos 2nw_m t....(8)$$

และ

$$\sin(m_f \sin w_m t) = 2 \Sigma J_{2n+1}(m_f)\sin (2n+1)w_m t..(9)$$

แทนค่าสมการ (8) และ (9) ลงใน (7) และจัดให้ดูง่ายขึ้นเป็น

$$e = E_c \sin w_c t \{ J_0(m_f) + 2J_2(m_f) \cos 2w_m t + 2J_4(m_f) \cos 4w_m t + ... \}$$
$$+ E_c \cos w_c t \{ 2J_1(m_f) \sin w_m t + 2J_3(m_f) \sin w_m t + ... \} .....(10)$$

จาก $\sin A \cos B = 1/2 \{ \sin(A+B) + \sin(A-B) \}$

$\cos A \sin B = 1/2 \{ \sin(A+B) - \sin(A-B) \}$

แทนค่าใน (10) จะได้

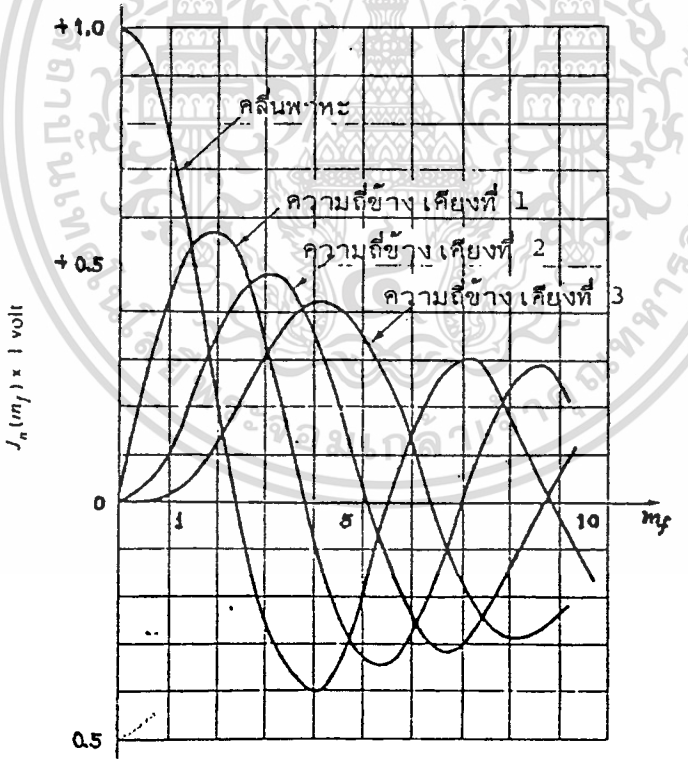
$$e = J_0 (m_f) E_c \sin w_c t$$
$$+ J_1 (m_f) E_c \{ \sin(w_c + w_m)t - \sin(w_c - w_m)t \}$$
$$+ J_2 (m_f) E_c \{ \sin(w_c + 2w_m)t + \sin(w_c - 2w_m)t \}$$
$$+ J_3 (m_f) E_c \{ \sin(w_c + 3w_m)t - \sin(w_c - 3w_m)t \}$$
$$+ J_4 ....(11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย function $J_n(m_f)$ คือ Bessel function แบบแรกที่เทอม n และแสดงได้ด้วยสมการต่อเนื่อง ดังนี้

$$J_n(m_f) = m_f^n/2^n n! \{ 1 - m_f^2/2(2n+2) + m_f^4/2(4)(2n+2)(2n+4) - m_f^6/2(4)(6)(2n+2)(2n+4)(2n+6) - \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \} \quad \ldots\ldots(12)$$

การหาค่า $J_n(m_f)$ คือกำหนด m_f ลงไป แล้วแทนค่า n ซึ่งหมายถึง sideband คู่ที่ n ที่ละค่า ก็จะได้ amplitude ของ sideband ของแต่ละคู่ออกมา จาก(12) จะเห็นว่า sideband มีมากมายถึง infinity คู่ โดยมี amplitude เปลี่ยนแปลงไปตาม Bessel function $J_n(m_f)$ ดังแสดงในgraph



รูปที่ 1 แสดง Bessel function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีการมอดูเลต m_f	คลื่นพาหะ J_0	ความถี่ข้างเคียง											
		1st J_1	2nd J_2	3rd J_3	4th J_4	5th J_5	6th J_6	7th J_7	8th J_8	9th J_9	10th J_{10}	11th J_{11}	12th J_{12}
0.25	0.98	0.12	0.01										
0.5	0.94	0.24	0.03										
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02									
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01								
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03	0.01							
2.4	0	0.52	0.43	0.20	0.06								
3.0	−0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01						
4.0	−0.40	−0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02					
5.0	−0.18	−0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02	0.01			
5.5	0	−0.34	−0.12	0.26	0.40	0.32	0.19	0.09	0.03	0.01			
6.0	0.15	−0.28	−0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.02	0.01		
7.0	0.30	0	−0.30	−0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13	0.06	0.02	0.01	
8.0	0.17	0.23	−0.11	−0.29	−0.10	0.19	0.34	0.32	0.22	0.13	0.06	0.03	0.01
8.65	0	0.27	0.06	−0.24	−0.23	0.03	0.26	0.34	0.28	0.18	0.10	0.05	0.02

ตารางที่ 1

จากสมการที่ (12) และรูปที่ 1 จะเห็นว่าใน FM ส่วนของ carrier จะไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงไปตาม Modulation index (m_f) ซึ่งเท่ากับ frequency deviation หารด้วย modulating frequency ในกรณีที่ m_f = 2.4 จะเห็นว่า J_0 (ที่ 2.4) คือขนาดของ carrier จะลดลงเป็นศูนย์ ความจริงของอันนี้ก็ใช้เป็นประโยชน์ได้ ในการจัดความถี่ที่เปลี่ยนแปลง นั่นคือจากการใช้ดูว่า carrier มี Amplitude ลดลงเป็นศูนย์ครั้งแรกเมื่อไร ก็แสดงว่าขณะนี้ frequency deviate (เปลี่ยนไป) เป็น 2.4 เท่าของ frequency ที่เข้าไป Mod.

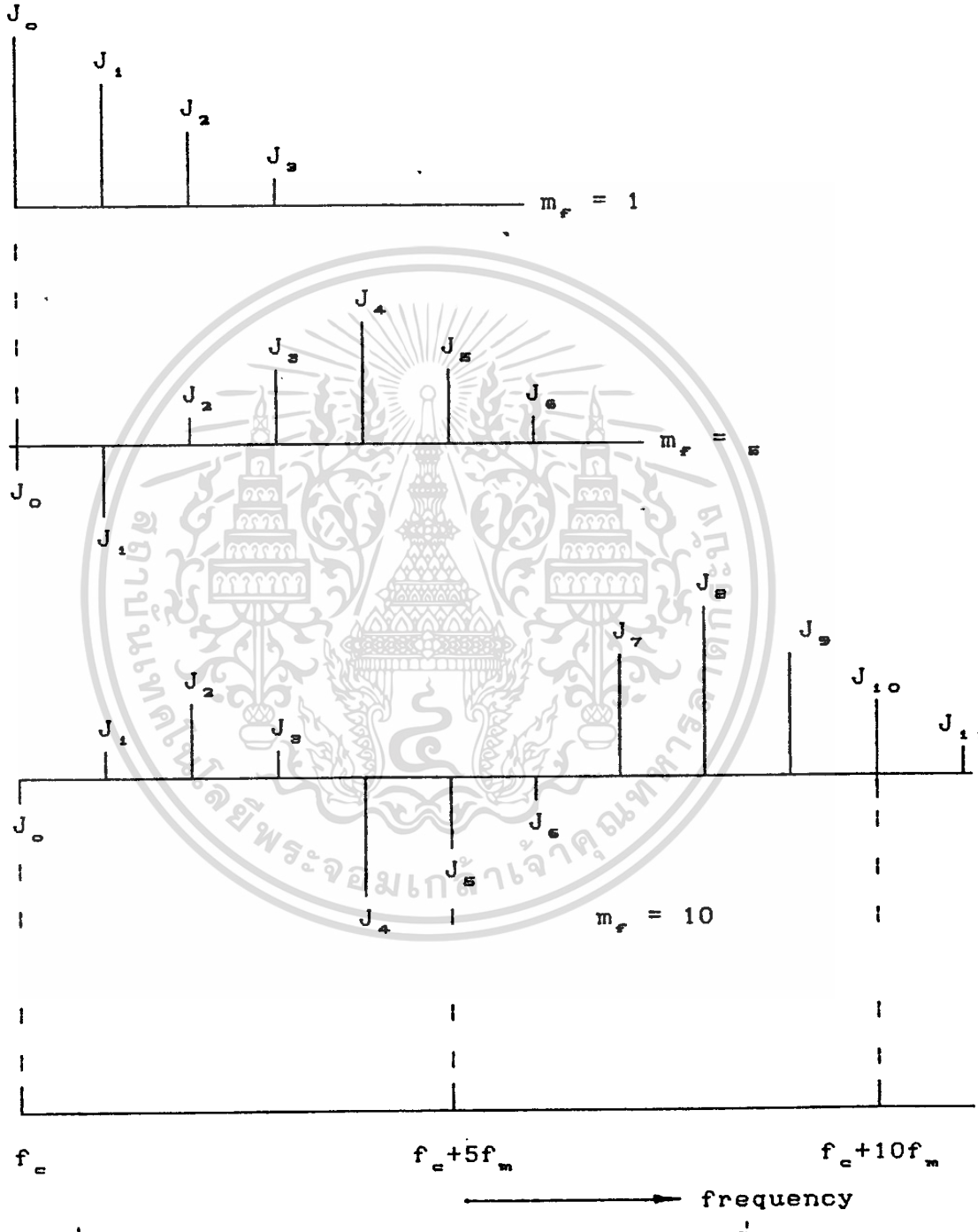
ตารางข้างล่างนี้จะแสดงค่าของ Bessel function หรือ Amplitude ของ carrier หรือ sideband คู่ที่ n = 0,1,2,3,..... ว่าจะมีขนาดลดลงเป็นศูนย์ที่ m_f มีค่าอย่างไรบ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	
2.048	3.882	5.135	6.379	7.586	8.780	
5.526	7.016	8.417	9.760	11.064	12.339	
8.654	10.173	11.620	13.017	14.373	15.700	
11.794	13.323	14.796	16.224	17.616	18.892	
14.931	16.470	17.960	19.410	20.827	22.220	
18.071	19.616	21.117	22.583	24.018	25.431	
21.212	22.760	24.270	25.749	27.200	28.628	

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าที่ m_f น้อยกว่า 0.5 จะมี sideband เพียง 1 คู่ เหมือนกับระบบ AM เพราะคู่ถัดไปมี Amplitude ต่ำมากจนตัดทิ้งไปได้ แต่อย่างไรก็ตามโดยใช้ความถี่ f_m ความถี่เดียว Mod เข้าไปจะเกิดจำนวนคู่ของ sideband อย่างมากมาย และอยู่ห่างกันเป็นระยะของ f_m ดังรูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 แสดง Spectrum ทาง LSB และ USB ของคลื่น FM.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถ FM. Sideband Analyze มาวัดดู spectrum หรือแถวของ sideband นี้ดูได้โดยจะปรากฏบนจอของ scope

จากรูปที่ 1 และรูปที่ 2 จะเห็นว่าค่าของ carrier และ sideband มีค่าเป็นลบนั้นแสดงถึง phase ของมันกลับกัน 180° แต่ถ้าดูใน spectrum Analyzer ซึ่งแสดงเฉพาะความสูงเท่านั้น spectrum ทุกอันจึงอยู่ด้านบนเสมอ และจาก (11) ถ้าดูเฉพาะขนาดของ sideband (โดยใช้ carrier frequency เป็นศูนย์กลาง) จะ Symmetry กันทั้ง Lower sideband (LSB) และ Upper sideband (USB)

<u>หมายเหตุ</u> ถ้าให้ Maximum frequency deviation = Δf
และ Actual frequency deviation = f_d

จะได้ modulation degree = $K_f = f_d / \Delta f$ .....(12)

เช่นในการส่ง FM กระจายเสียงให้ Δf = 75 KHz
ถ้าเราให้ Audio Amplitude ทำให้ f_d = 75 KHz เท่าที่ Limit
ก็จะได้ modulation degree = 1 หรือก็คือ 100 % modulation เมื่อเทียบกับ AM จาก (12)

$$\text{modulation index} = m_f = (\Delta f/f_m) * K_f$$
$$= (\Delta f/f_m) * (f_d/\Delta f)$$
$$\text{หรือก็คือ} = f_d/f_m$$

มีผู้เขียนบางคนใช้ $m_f = \Delta f/f_m$ หมายความว่าเขาใช้ $K_f = 1$ คือที่ 100 % mod เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Necessary Bandwidth สำหรับคลื่น FM.

เมื่อ modulation index มีค่าต่ำ ๆ BW ใน FM จะเป็น 2 เท่าของความถี่สูงสุดที่เข้ามา mod ($2f_m$) เหมือนกันใน AM

แต่ตามปกติแล้ว Sideband จะมีได้ถึง infinity คู่อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติคือผลจริงๆ แล้วส่วนใหญ่ของพลังงานของ Sidebandจะมีอยู่ในย่านหนึ่งเท่านั้นลองพิจารณาดู โดยใช้ Single Sinusoidal wave mod เข้าไป ทำให้เกิด sideband ได้ N คู่ พลังงานถึง N คู่นี้กับพลังงานทั้งหมดเทียบกันจะได้

$$A = \frac{\Sigma J_n^2 (m_f)}{\Sigma J_n^2 (m_f)}$$

แต่จากการทดลองของ Bessel function จะได้ว่า $\Sigma J_n^2(m_f) = 1$ (J_0 ให้สูงสุด = 1 และพลังงานทั้งหมดก็ได้จาก J_0 หรือ carrier)
ดังนั้น

$$A = \Sigma J_n^2 (inf)$$

ถ้าสมมติว่า N มีค่าเท่ากับ m_f แทนค่าลงไป [คือ $2(J_1^2 + J_2^2 + \ldots\ldots\ldots + J_n^2)$] ได้ A = 0.95 หรือก็คือใน Bandwidth ของ $2f_d$ นี้ 95% พลังงานทั้งหมดจะถูกส่งออกไปหรือพลังงานทั้งหมดจะไปอยู่ใน sideband ถึง 95% ที่กล่าวมานี้หมายถึง single sinusoidal wave แต่ถ้าใช้ rectangular wave โดยใช้ BW เดิมนี้ พลังงานจะลดลงเหลือเพียง 80% เท่านั้น แต่ถ้าคิด sideband ถึงคู่ที่ (m_f+1) พลังงานเพิ่มเป็น 93% ฉะนั้นในการหา BW เราจึงคิดถึงคู่ที่ (m_f+1) และ BW นี้เรียกว่า Necessary bandwidth

จาก curve ของ Bessel function หรือจาก frequency spectrum จะเห็นว่า relative amplitude ของ sideband คู่ที่ (m_f+1) จะน้อยกว่า 0.15 และคู่ที่ (m_f+2) จะน้อยกว่า 0.05 ดังนั้น โดยการดู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

spectrum เราจะคิด BW ถึง sideband คู่ที่มี Amplitude ต่ำเป็น 1% ของ carrier ขณะยังไม่ได้ถูก mod.

ตัวอย่าง เช่นถ้า max. frequency deviation = 75 KHz

max. modulating frequency = 15 KHz

m_f = 75 KHz / 15 KHz

= 5

ดังนั้น Bandwidth จะคิดถึง Sideband คู่ที่ 5 + 1 = 6

โดย BW = $2(m_f+1)f_m$

ฉะนั้น BW = 2*(5+1) * 15 KHz

= 180 KHz

ค่าเฉลี่ยกำลังงาน

จาก Bessel ฟังก์ชันทำให้รู้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของแต่ละความถี่ข้างเคียงกับความสูงของคลื่นพาห์ที่ยังไม่ม็อดดูเลท ดังนี้

$$E_n = J_n E_c$$

กำหนดให้ E_n และ E_c คือค่า rms ของคลื่นซายน์และกำลังงานที่อยู่ในแต่ละคลื่นซายน์คือ

$$P_n = (E_n)^2 / R$$

กำลังงานทั้งหมดสำหรับสัญญาณม็อดดูเลท คือ

$$\begin{aligned} P_T &= P_0 + 2P_1 + 2P_2 + \ldots \\ &= (E_0)^2/R + (2E_1)^2/R + (2E_2)^2/R + \ldots \\ &= (J_0E_c)^2/R + (2J_1E_c)^2/R + (2J_2E_c)^2/R + \ldots \\ &= P_c\,[(J_0)^2 + 2\{(J_1)^2 + (J_2)^2 + \ldots\}] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดตัวชี้ การม็อดดูเลท

สเปคตรัมของคลื่นม็อดดูเลทซายน์ สามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมและความเบี่ยงเบนของความถี่คลื่นพาห์วัดได้จากมิเตอร์วัดความเบี่ยงเบนความถี่ เช่น เราสามารถปรับคลื่นพาห์ของสัญญาณม็อดดูเลทซึ่งดูได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปคตรัมจนหายไป ความสูงของการม็อดดูเลทในกรณีนี้จะมีอัตราส่วนเป็น 2.4:5.5:8.65 จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าเป็นค่าของ m_f เมื่อคลื่นพาห์เป็นศูนย์ การวัดค่าเบี่ยงเบนทำให้คำนวณหา m_f ได้ ซึ่งนำไปสู่การหาค่า f_m

ในการส่งกระจายเสียงแบบ FM นั้น FCC (Federal Communication Commission) ได้กำหนดไว้ว่า

1. Maximum Frequency deviation = $\pm$ 75 KHz
2. Bandwidth = 200 KHz (รวม guard band ข้างละ 25 KHz ด้วย)
3. Frequency stability carrier $\pm$ 2 KHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Oscillator

ระบบการสื่อสารโดยทั่วๆ ไปมีความจำเป็นที่จะต้องใช้คลื่นรูปไซน์ในการทำงานเป็นอย่างมาก หรืออาจจะพูดอีกนัยหนึ่งได้ว่า ระบบการสื่อสารแทบจะทำงานไม่ได้ถ้าขาดแหล่งผลิตคลื่นรูปไซน์ มีวงจรหลายชนิดที่ใช้ผลิตคลื่นรูปไซน์เหล่านี้ เช่น วงจรออสซิเลเตอร์แบบป้อนกลับ (Feedback Oscillator) วงจร RC และวงจรจูน LC ความถี่ที่ผลิตนี้เริ่มตั้งแต่ความถี่เสียงถึงความถี่ VHF ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่าร์ (Bipolar Transistor) และ Field-effect Transistor หรือ FET สำหรับวงจรออสซิเลเตอร์ที่ใช้คริสตอล (Crystal) ควบคุมนั้นจะจัดอยู่ในประเภทวงจรจูน LC

วงจรออสซิเลเตอร์ป้อนกลับแบบบวก

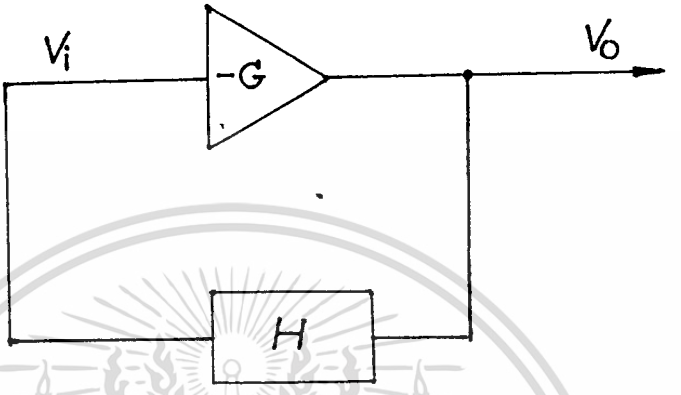
การป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback) เป็นพื้นฐานของวงจรออสซิเลเตอร์โดยทั่วๆ ไปที่ใช้กันอยู่ รูป 1 แสดงถึงวงจรขยายแบบป้อนกลับ (Feedback Amplifier) ภายใต้สถานะอันหนึ่ง สามารถทำให้วงจรนี้มีการป้อนกลับแบบบวกและกลายเป็นวงจรผลิตความถี่ (Oscillator Circuit) ขึ้นมา

ข้อแม้ของวงจรที่จะทำให้เกิดการออสซิเลทได้นั้นจะต้องมี (1) อัตราการขยายในลูปป้อนกลับจะต้องมากกว่า 1 และ (2) เฟสที่เปลี่ยนไป (Phase Shift) ในลูปนี้จะต้องเป็นเฟส บวก คูณ ด้วย 2π เรเดียน หรือ 360 องศา ข้อ 1 และข้อ 2 จะต้องเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันจึงจะทำให้เกิดการออสซิเลทได้

$$\text{อัตราขยายในลูป (Loop Gain)} = /GH/ \angle \phi \qquad (1)$$

กำหนดให้ $n = 0, 1, 2, 3, \ldots\ldots$, $\phi = n360$ องศา และ $/GH/ >= 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 1 วงจรออสซิเลเตอร์ที่ใช้การป้อนกลับแบบบวก

วงจรขยายโดยทั่วๆ ไปจะมีเฟสของสัญญาณเอ้าท์พุทตรงข้ามกับสัญญาณอินพุท 180 องศา และมีอัตราการขยายมากกว่า 1 สมมติให้ G ตามรูป 1 คือ การขยายของวงจรและ H คือการป้อนกลับของลูป ดังนั้นอัตราการขยายของวงจรภายในลูปนี้คือผลคูณของ G และ H และการขยายทั้งหมดของวงจร (Overall Gain) ที่มีการป้อนกลับ คือ

$$A_v = (G/1-GH) \qquad (2)$$

กำหนดให้

A_v = การขยายทั้งหมดของวงจร

G = ส่วนการขยายของวงจร

H = ส่วนการขยายของการป้อนกลับ

GH = การขยายของลูป

ค่าที่กำหนดทั้งหมดนี้เป็นค่าคอมเพล็ก (Complex) ซึ่งหมายถึง ขนาดและเฟส (Magnetude and phase angle) รวมอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ของออสซิเลเตอร์นี้ ถูกกำหนดโดยส่วนประกอบของ H ซึ่งทำให้เฟสเปลี่ยนไป 180 องศา การเลือกค่าขององค์ประกอบเหล่านี้ต้องเลือกด้วยความระมัดระวังเพื่อให้เกิดเฟสชิฟ 180 องศาที่ความถี่เดียวเท่านั้น และความถี่นี้คือความถี่ของออสซิเลเตอร์ที่นำไปใช้

วงจรจูน LC ออสซิเลเตอร์

วงลรจูน LC ออสซิเลเตอร์เป็นวงจรป้อนกลับอีกชนิดหนึ่งตามรูป 2 (a) ซึ่งมีวงจรสมมูลย์ (Equivalent Circuit) ตามรูป 2 (b) วงจรขยายนี้เป็นแบบอีมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter Amplifier) ตัวภาระของวงจรขยายนี้คือ วงจรจูนแท้งค์ LC ต่อขนานกับความต้านทานเอ้าท์พุทของวงจรขยายและความต้านทานอินพุทที่สะท้อนกลับผ่านหม้อแปลง หม้อแปลงนี้จะทำหน้าที่นำเอาสัญญาณเอ้าท์พุทมาเข้าอินพุทให้มีเฟส 180 องศา สำหรับเป็นการป้อนกลับแบบบวก C_c และความต้านทานเบสเป็นตัวไบแอสทรานซิสเตอร์ให้หยุดทำงานเมื่อระดับของสัญญาณสูงขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้การขยายลดลงจนกระทั่งค่าของการขยายในลูปเท่ากับหนึ่งเพื่อรักษาระดับการออสซิเลทให้เพียงพอ

ในขณะที่เกิดความถี่รีโซแนนซ์ของวงจรแท้งค์ระหว่าง L_c และ C_c นั้นค่าซับเซปแตนซ์ (Susceptance) ของวงจรแท้งค์นี้เท่ากับศูนย์ ทำให้ดูเหมือนเหลือเพียงค่า R เท่านั้น ในสภาพเช่นนี้ วงจรขยายจะมีเฟสเปลี่ยนไป 180 องศา และหม้อแปลงเองก็ทำให้เฟสเปลี่ยนไปอีก 180 องศา ทำให้เฟสเปลี่ยนไป = 0 องศา (หรือ 360 องศา) สำหรับในลูป

วงจรแท้งค์ที่ทำหน้าที่เหมือนความต้านทานนี้ จะทำให้ความถี่รีโซแนนซ์ที่ผลิตได้ในวงจรเปลี่ยนไปเล็กน้อย ทำให้เสถียรภาพ (Stable) ในการผลิตไม่ดี ดังนั้นจึงควรจะเลือกวงจรแทงค์ที่มี Q มากๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่สูง ความถี่รีโซแนนซ์ของออสซิเลเตอร์นี้คือ

$$f_o = 1/2\pi\sqrt{LC} \quad , \quad /A_v/ >= L_b/M \qquad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าความต้านทานเอ้าพุทของวงจรนี้น้อยมากไม่ต้องนำมาคิดและ V_m/V_b เท่ากับ M/L_b

ความต้านทานเบสเป็นตัวไบอัสครั้งแรกให้วงจรออสซิเลเตอร์เริ่มต้นออสซิเลท ทรานซิสเตอร์จะถูกไบอัสที่จุดกึ่งกลางของช่วงแอคทีฟซึ่งจะให้อัตราการขยายสูงสุด หลังจากเริ่มออสซิเลทแล้ว ค่าสูงสุดด้านบวกของความถี่ออสซิเลเตอร์จะไปกระตุ้นแก่เบสให้เริ่มทำงานใหม่ C_c จะถูกประจุให้มีค่าลบมากขึ้น ทำให้ทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน การทำงานนี้เป็นการขยายแบบ Class C

<u>ตัวอย่าง</u> จากรูป 2 ถ้าทรานซิสเตอร์มี B = 100, r_e = 5 kOhm, G_m = 50 ms, r_o = 50 kOhm และหม้อแปลงมี M = 25 uH และ Q = 100 ที่ความถี่เรโซแนนซ์จูนนิ่ง คาแพซิเตอร์ = 100 pF ตัวภาระทางด้านทุติยภูมิน้อยมาก จงคำนวณหา

a) ความถี่ของการออสซิเลท

b) วงจรนี้จะออสซิเลทหรือไม่

<u>วิธีทำ</u> a) ความถี่ของการออสซิเลทคือ

$$f_o = 1/2\pi\sqrt{LC} = 1 / (6.28\sqrt{200\ uH * 100\ pF})$$

$$= 1.59\ MHz$$

b) ถ้ากำหนดให้การต่อขนาน Q_p คือ $Q_p = R_p / X_L$, และ $R_p = R_D$, ดังนั้นความต้านทานภาระของวงจรขยายนี้ คือ

$$R_L = r_o // R_D = r_o // Q_p X_L$$

$$= 50\ kOhm // (100 * 2\pi * 1.59\ MHz * 100\ uH)$$

$$= 33.33\ kOhm$$

การขยายของวงจรนี้คือ

$$A_v = -G_m R_L$$

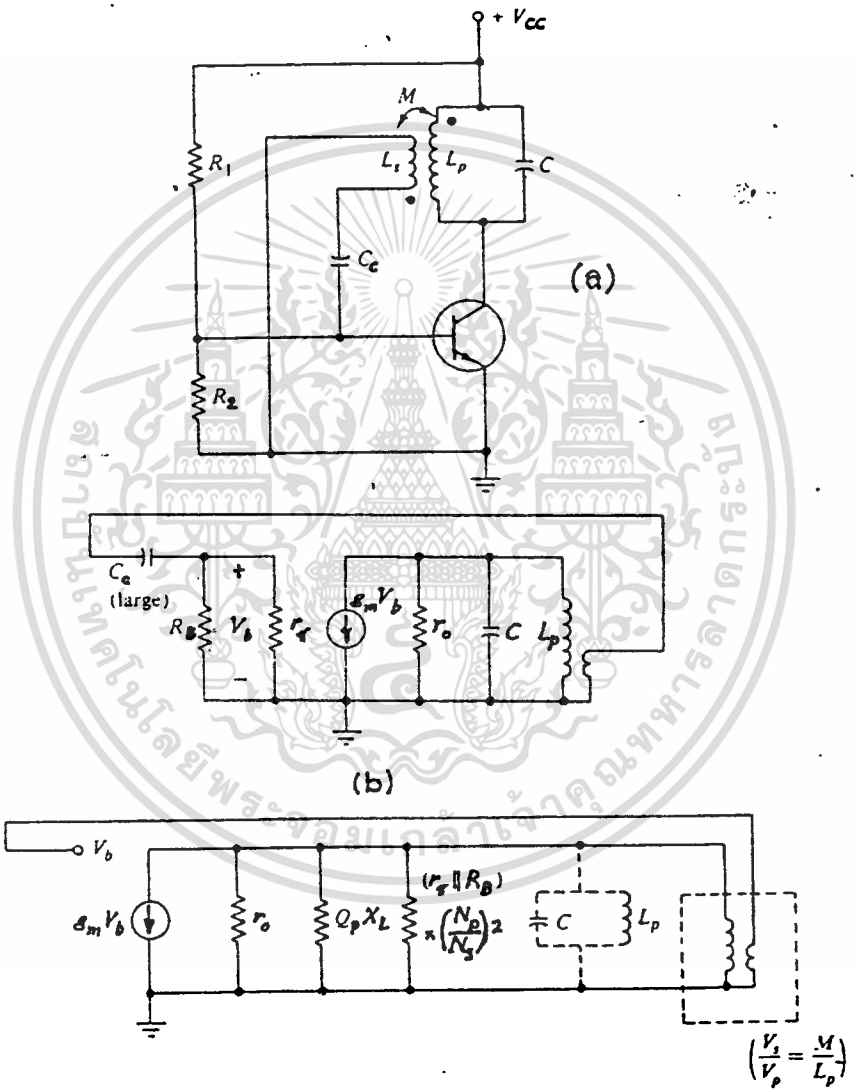
$$= - 20 * 33.3$$

$$= - 676$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_p / M = 100/25 = 4 < /A_v/$$

ค่านี้เกินพอสำหรับการออสซิเลท

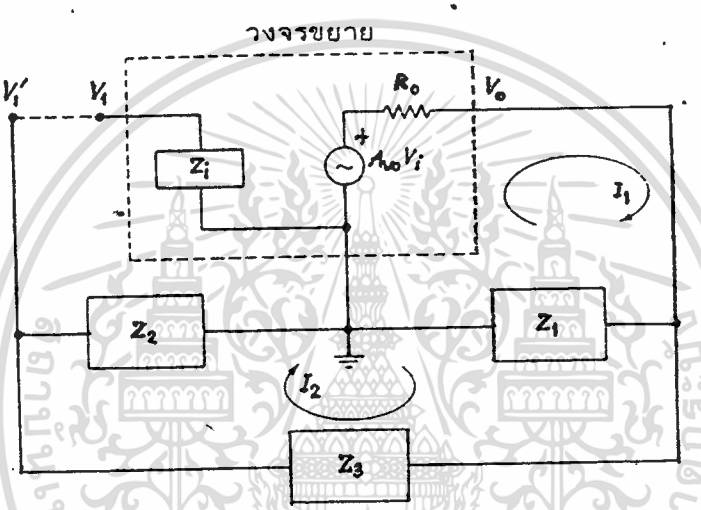


รูป 2 วงจรจูน RC ออสซิเลเตอร์ (a) วงจร
(b) วงจรสมมูลย์ AC (c) วงจรสมมูลย์ AC แบบง่ายๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรจูน LC ออสซิเลเตอร์

ลักษณะทั่วๆ ไปของ LC ออสซิเลเตอร์



รูป 3 วงจรออสซิเลเตอร์โดยทั่วๆ ไป

รูปแบบโดยทั่วๆ ไปของวงจรจูนออสซิเลเตอร์แสดงตามรูป 3 วงจรขยายนี้มีอัตราการขยายสูงพอ โดยมี z_1, Z_2 และ Z_3 เป็นคอมเพล็กซ์อิมพีแดนซ์ที่ทำให้เกิดเฟสระหว่างอินพุทและเอ้าท์พุทเปลี่ยนไป วงจรนี้จะออสซิเลทเมื่อเฟสของลูปนี้เปลี่ยนไป 0 องศาและอัตราการขยายของลูปนี้ต้องเท่ากับหรือมากกว่าหนึ่ง การคำนวณสามารถแยกเป็น 2 ตอนดังนี้

$$A_{vo} V_1 = + I_1 (R_o + Z_1) - I_2 (Z_1)$$
$$= - I_1 Z_1 + I_2 (Z_1 + Z_2 + Z_3)$$

และ

$$I_2 = V_1 / Z_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$Z_1 \alpha = \alpha(\text{infinity})$$

จากการแก้สมการเหล่านี้จะได้

$$A_{v(loop)} = V_1 / V_1$$

$$= \frac{- A_{vo}[Z_1 Z_2]}{(Z_1)^2 - (Z_1 + Z_2 + Z_3)(R_o + Z_2)]} \qquad (4)$$

เนื่องจากในขณะรีโซแนนซ์นั้น $(Z_1+Z_2+Z_3)$ จะมีค่ารีโซแนนซ์ที่ต่อแบบอนุกรม Q สูงมาก ค่าความต้านทานลูปน้อยมากตัดทิ้งไปได้ ผลรวมของรีแอคแตนซ์ทั้งหมดเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$Z_1 + Z_2 + Z_3 = X_1 + X_2 + X_3 = 0 \qquad (5)$$

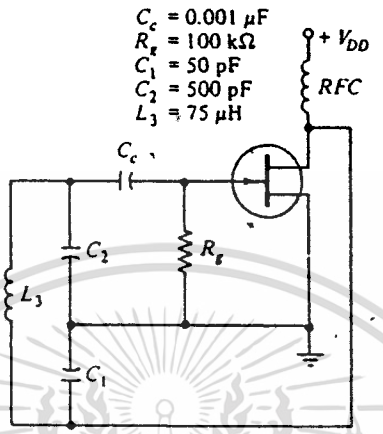
และค่าการขยายภายในลูปลดลงเป็น

$$A_{v(loop)} = - A_{vo} X_2/X_1 >= 1 \qquad (6)$$

ออสซิเลเตอร์แบบ Colpitts

FET Colpitts ออสซิเลเตอร์แสดงตามรูป 4 (a) Z_1 และ Z_2 คือ คาปาซิเตอร์และ Z_3 เป็นอินดัคเตอร์ RF โช้คจะมีค่าความต้านทานต่ำสำหรับ dc เพื่อเป็นกระแสคอลเลคเตอร์จะกั้นสัญญาณไม่ให้ผ่านไปยัง V_{dd} ค่า C_c และ R_g จะไบอัสทรานซิสเตอร์ให้ทำงานใน Class C หลังจากที่เริ่มการออสซิเลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 วงจรออสซิเลเตอร์แบบ Colpitts

จากสมการ 5 ความถี่รีโซแนนซ์เท่ากับ

$$f_o = 1 / 2\pi \sqrt{L_3 C_{eq}} \qquad (7)$$

กำหนดให้ $C_{eq} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$, C_1 และ C_2 ต่ออนุกรมกัน อัตราขยายต่ำสุดที่กำหนดให้เพื่อให้วงจรเกิดการออสซิเลท จากสมการ 6 คือ

สำหรับ $A_{v(loop)} >= 1$

$$/A_v/ >= X_1 / X_2 = C_2 / C_1 \qquad (8)$$

<u>ตัวอย่าง</u> จากรูป 4 (a) โดยใช้ N-channel FET และมีไบอัสสำหรับ g_m = 2 ms และ r_d = 10 kOhm จงคำนวณหาความถี่ของการออสซิเลทและวงจรนี้จะเกิดการออสซิเลทหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>วิธีทำ</u> จากสมการ 7 ความถี่ในการออสซิเลทคือ

$$C_{eq} = C_1 C_2 / C_1 + C_2 = 500 * 50 / 500 + .50$$
$$= 45.5 \text{ pF}$$

$$f_o = 1 / 2\pi \sqrt{L_g C_{eq}}$$
$$= 1 / 2\pi \sqrt{75 * 10^{-6} * 45.5 * 10^{-12}}$$
$$= 2.72 \text{ MHz}$$

การขยายของวงจรเปิด (Open-circuit amplifier) คือ

$$A_{vo} = - g_m r_d = - 2 \text{ ms} * 10 \text{ kOhm} = - 20$$

จากสมการ (6) การขยายของลูปคือ

$$A_{v(loop)} = - A_{vo} (C_1 / C_2)$$
$$= + 20 * (50/500)$$
$$= + 2 (>1)$$

ดังนั้นวงจรนี้เกิดการออสซิเลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรภาพของออสซิเลเตอร์

เสถียรภาพ (Stability) ของออสซิเลเตอร์นั้น อาจจะมองได้จากความสามารถในการผลิตความถี่ว่าได้ตามที่ต้องการหรือไม่ การออสซิเลทโดยตัวของมันเองและสามารักษาการออสซิเลทได้ตลอดสภาวะหรือไม่ หรือรักษาระดับของการออสซิเลทได้ทุกสภาวะหรือไม่

ในทางปฏิบัติ วัสดุที่ใช้ในวงจรออสซิเลเตอร์มีผลต่อการออสซิเลทความถี่ เช่น ความถี่ของวงจรจูนออสซิเลเตอร์ขึ้นอยู่กับอนุกรมอิมพิแดนซ์ของ $Z_1 + Z_2 + Z_3$ ในการคำนวณคำนึงถึงเฉพาะค่ารีแอคแตนซ์เท่านั้น โดยคิดค่าความต้านทานเป็นศูนย์ซึ่งไม่เป็นจริงเสมอไปค่าเอ้าท์พุทและอินพุทของวงจรขยายและค่าความต้านทานต่างๆ ภายในวงจรจะทำให้ Q ลดลงไป ทำให้ส่วนโค้งขณะรีโซแนนซ์กว้างขึ้น นอกจากนั้นยังมีค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นเอง (Parasitic capacitance) ขนานกับ Z_1 และ Z_2 ค่านี้จะมีช่วงกว้างในการเปลี่ยนแปรมาก ขึ้นอยู่กับโวลเตจที่ให้กับวงจรขยายอุณหภูมิและค่าตัวภาระอย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิก็มีทางป้องกันให้น้อยได้โดยลดระดับกำลังงานที่ใช้กับวงจรและไม่ให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิรอบข้าง หรือคัดเลือกวัสดุที่นำมาใช้ให้มีคุณสมบัติลบล้างกันในวงจรเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปหรือเอาวงจรไปไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ วัสดุที่ใช้ในวงจรแท้งค์ก็จะต้องแข็งแรงทนทานต่อการสั่นสะเทือนจากภายนอก ถ้าขดลวดที่ใช้เปลี่ยนรูปร่างไปก็จะทำให้ความถี่ที่สร้างขึ้นมาเปลี่ยนไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frequency division multiplexing

ในระบบสื่อสารที่ต้องการส่งข่าวสารจำนวนมากๆ พร้อมกัน เรามักจะใช้วิธีการที่เรียกว่า มัลติเพล็กซิ่ง (multiplexing) มัลติเพล็กซิ่งคือ การส่งสัญญาณข่าวสารหลายๆ สัญญานภายใต้ตัวพา (carrier) ตัวเดียวกัน มัลติเพล็กซิ่งนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. ฟรีเควันซีดิวิชั่นมัลติเพล็กซิ่ง (Frequency division multiplexing)
2. ไทม์ดิวิชั่นมัลติเพล็กซิ่ง (Time division multiplexing)

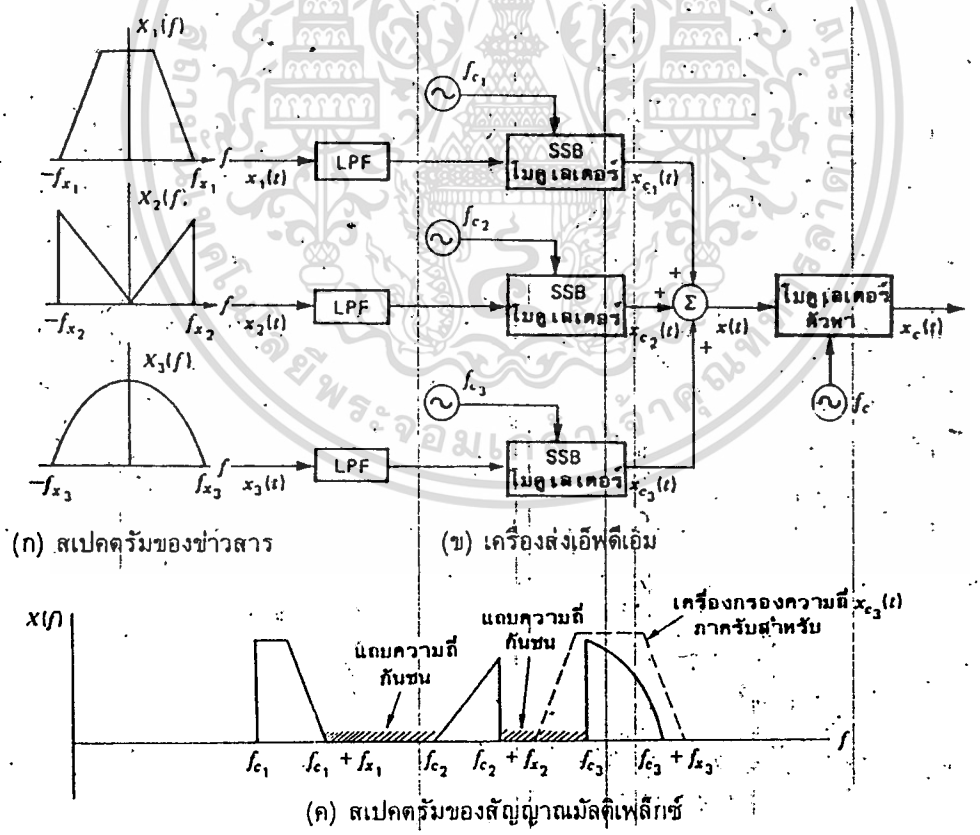
ฟรีเควันซีดิวิชั่นมัลติเพล็กซิ่งหรือที่เรียกชื่อย่อว่า เอฟดีเอ็ม (FDM) คือการแบ่งแถบความถี่ (bandwidth) เป็นช่วงๆ ไม่เหลื่อมล้ำกันให้แก่สัญญาณข่าวสารจำนวนมากสัญญาณละ 1 ช่วง แล้วนำสัญญาณเหล่านี้ไปม็อดดูเลทกับตัวพา(carrier) ตัวเดียวกันเพื่อส่ง (transmission) ต่อไป สัญญาณข่าวสารแต่ละสัญญาณนี้สามารถเอาออกมาจากสัญญาณเอฟดีเอ็มได้โดยดีม็อดดูเลทสัญญาณเอฟดีเอ็มก่อนแล้วผ่านเครื่องกรองความถี่ที่มีความถี่ตรงกัน เอฟดีเอ็มนี้ใช้ในโทรศัพท์ระยะทางไกล เอฟดีเอ็มสเตริโอ และการแพร่ภาพทีวี โทรมาตร (telemetering) ที่ใช้ในการสำรวจอวกาศ และงานอื่นๆ

หลักการกำเนิดเอฟดีเอ็มแสดงในรูปที่ 1 สำหรับสัญญาณข่าวสาร n ตัว ซึ่งสมมติว่าถูกจำกัดแถบความถี่ โดยทั่วไปถ้าสัญญาณข่าวสารไม่ถูกจำกัดความถี่ให้ผ่านเครื่องกรองความถี่ต่ำผ่านแทน สัญญาณที่ถูกจำกัดแถบความถี่แต่ละตัวจะม็อดดูเลท ตัวพาห์ย่อย (subcarrier) ที่ความถี่ f_{c1}, f_{c2}, ... และ f_{cn} การม็อดดูเลท ตัวพาห์ย่อย (subcarrier) ที่แสดงในตัวอย่างนี้คือ สัญญาณที่ถูกม็อดดูเลทแล้ว (modulated signals) จะรวมกันเป็นสัญญาณมัลติเพล็กซ์ร่วมกัน x(t) (composite multiplexed signal) ถ้าเราเลือกความถี่ของตัวพาห์ย่อยอย่างเหมาะสมแล้ว แต่ละสัญญาณข่าวสารก็จะครอบครองช่วงความถี่หนึ่งที่ไม่เหลื่อมล้ำกับช่วงความถี่อื่น ในขณะที่สัญญาณข่าวสารแต่ละสัญญาณสามารถแยกให้เห็นชัดใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

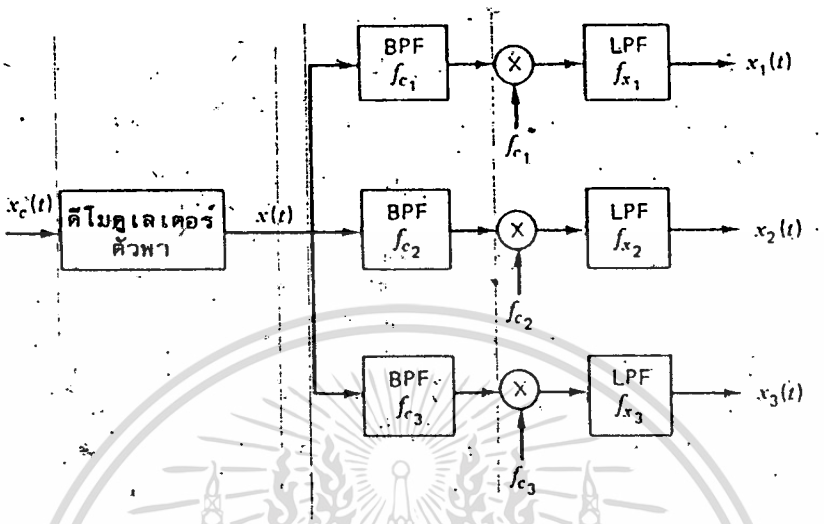
เชิงความถี่ (frequency domain) สัญญาณที่ถูกมัลติเพล็กซ์แล้วจะไม่มีส่วนคล้ายคลึงกับสัญญาณข่าวสารทั้งในเชิงความถี่และเชิงเวลา (time domain) สัญญาณที่ถูกมัลติเพล็กซ์ แล้วอาจจะส่งโดยตรงหรือนำไปม็อดดูเลทกับตัวพาห์ที่ความถี่ f_c ก่อนส่ง

การกลับคืนสู่สัญญาณข่าวสารเดิมนั้น แสดงในรูปที่ 2 ขั้นแรกในการกลับคืนสู่สัญญาณข่าวสารเดิมคือ การดีม็อดดูเลทเพื่อให้ได้สัญญาณมัลติเพล็กซ์ร่วม $x(t)$ จาก $x_c(t)$ สัญญาณ $x_{c_1}(t)$, $x_{c_2}(t)$, ... และ $x_{c_n}(t)$ แยกจาก $x_c(t)$ ได้โดยผ่านเครื่องกรองความถี่ ในที่สุดจะได้สัญญาณข่าวสารกลับคืนมาโดยการดีม็อดดูเลท $x_{c_1}(t)$, $x_{c_2}(t)$, ... และ $x_{c_n}(t)$ อุปกรณ์การมัลติเพล็กซิ่งและการมัลติเพล็กซิ่ง มักจะเรียกชื่อย่อกันว่า "มักซ์" (MUX)



รูปที่ 1 ฟรีเคว้นซีดิวิชั่นมัลติเพล็กซิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 เครื่องรับเอฟดีเอ็ม

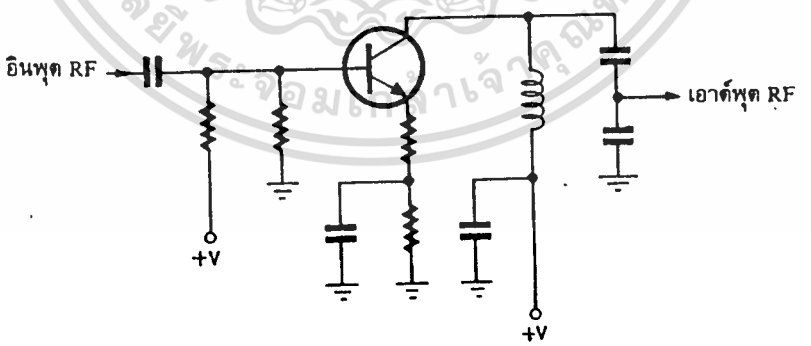
ในระบบมัลติเพล็กซ์ SSBSC (Single Sideband Suppressed Carrier) แต่ละช่องเสียง (voice channel) จะได้รับการจัดสรรความถี่ให้ 4 กิโลเฮิรตซ์เพื่อให้ความถี่เสียงตั้งแต่ 300 เฮิรตซ์ ถึง 3400 เฮิรตซ์อยู่ได้ นอกจากนี้ยังเผื่อช่วงความถี่หนึ่งที่ว่าง เพื่อทำหน้าที่เป็น guardband ระหว่างช่องเสียงเพื่อป้องกันเสียงแทรกระหว่างช่อง (interchannel crosstalk) เสียงแทรกนี้ส่วนมากเกิดจากความไม่เชิงเส้นในระบบและเกิดจากการแยกความถี่ของสัญญาณไม่ดีพอ เนื่องจากการกรองความถี่ที่ไม่สมบูรณ์และเนื่องจากการเคลื่อนที่ (drift) ของความถี่ของตัวพาห์ย่อย (subcarrier) ระบบมัลติเพล็กซ์มักจะมีวิธีการรวมกรุ๊ป (group) ของช่องเสียงเข้าด้วยกันเพื่อได้ช่องความถี่กว้าง(wideband channel). สำหรับสัญญาณที่ต้องใช้แถบความถี่กว้าง เช่น สัญญาณโทรทัศน์ หรือสัญญาณวีดีโอ (video) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขยายกำลัง RF

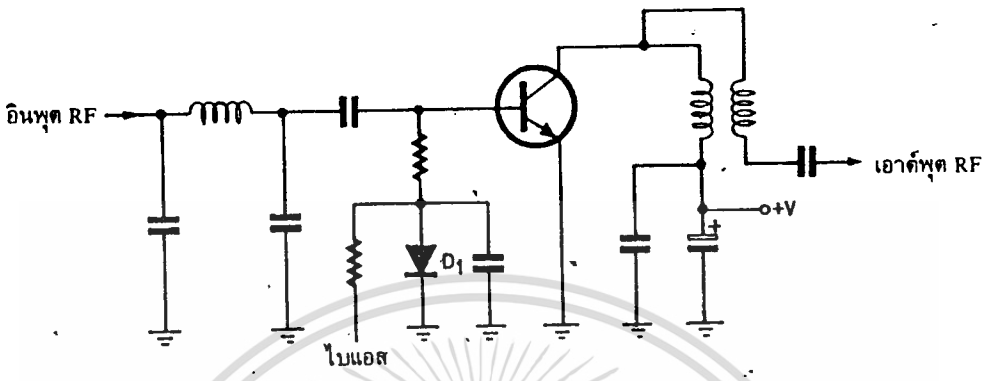
ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีกำลัง(ส่ง) สูงเพื่อส่งออกอากาศ ในกรณีของสัญญาณ SSB การขยายสัญญาณจะต้องมีความเป็นลิเนียร์ วงจรขยายคลาส A จะให้อัตราขยายสูงและมีความเป็นลิเนียร์ที่ดี แต่มีประสิทธิภาพต่ำ นิยมใช้ในสเตจที่กำลังยังน้อยเช่น วงจรขับ (driver) สำหรับสัญญาณที่มีกำลังมากขึ้น เรานิยมใช้วงจรขยายคลาส B เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงกว่า ประสิทธิภาพของวงจรขยายคลาส A มีค่าประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ส่วนคลาส B ให้ประสิทธิภาพสูงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ สำหรับวงจรขยายคลาส C นั้น ไม่สามารถนำมาใช้ขยายสัญญาณ SSB ได้ เพราะไม่มีความเป็นลิเนียร์ ส่วนมากเราใช้วงจรขยายคลาส C ในการขยายสัญญาณ CW และ FM

ในรูปที่ 1 วงจรขยายจูนคลาส A ซึ่งใช้ในภาคขยายสัญญาณกำลังน้อย ในกรณีของวงจรขยายสัญญาณกำลังมากขึ้น เรานิยมใช้วงจรขยายที่ไม่มีการจูน รูปที่ 2 วงจรขยายคลาส B สังเกตว่ามีไดโอด D_1 ต่อเพื่อชดเชยมิให้วงจรทำงานเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ส่วนมากไดโอดนี้มักจะติดตั้งอยู่ใกล้กับทรานซิสเตอร์



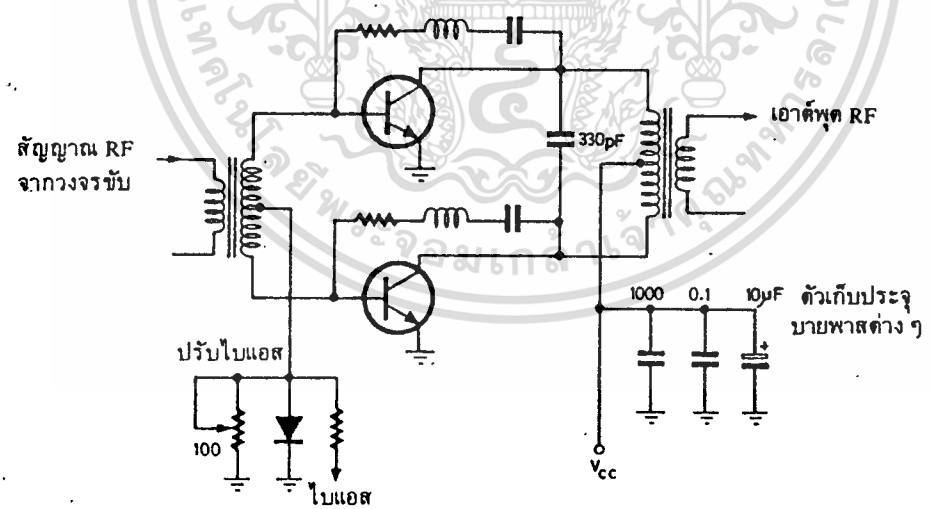
รูปที่ 1 วงจรขยายกำลังคลาส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 วงจรขยายกำลังปานกลาง คลาส B

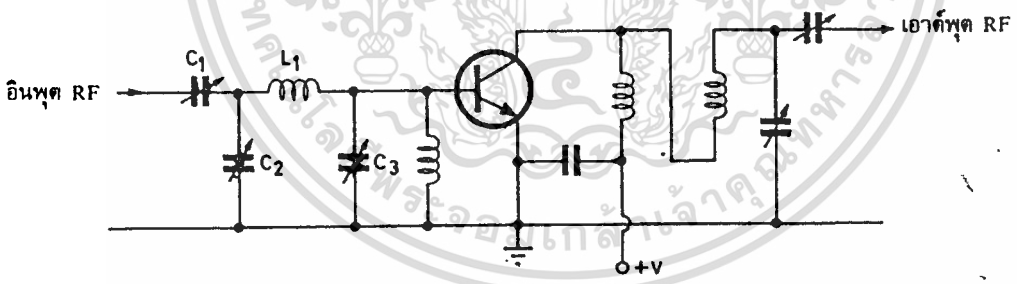
สำหรับวงจรขยายที่ลิเนียร์และต้องการขยายสัญญาณกำลังสูง ๆ เรานิยมใช้วงจรพุชพูล ดูรูปที่ 3 ข้อดีของวงจรพุชพูลก็คือ สัญญาณฮาร์โมนิกคู่จะหักล้างกันเอง



รูปที่ 3 วงจรขยายกำลังแบบพุชพูล

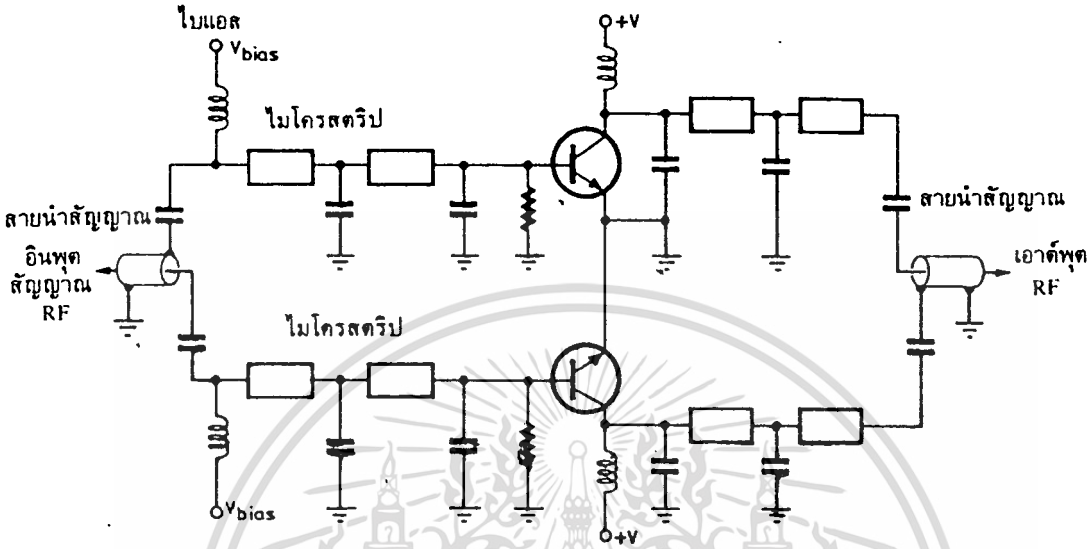
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของระบบ FM เราสามารถใช้วงจรขยายคลาส C ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าในการขยายกำลังได้ โดยทั่วไปวงจรขยายกำลังมักจะเป็นวงจรง่าย ๆ แต่การจัดวางอุปกรณ์จำเป็นต้องพิถีพิถัน โดยเฉพาะวงจรที่ทำงานในย่านความถี่สูง ในรูปที่ 4 แสดงวงจรขยายกำลังในย่านความถี่ VHF 150 เมกะเฮิรตซ์ จะเห็นว่าเราใช้ตัวเก็บประจุปรับค่าได้ในการแมตช์อิมพีแดนซ์ คือ ทำให้อิมพีแดนซ์อินพุทกับเอาท์พุตเท่ากัน รูปที่ 5 เป็นวงจรขยายกำลังลิเนียร์ในย่านความถี่ UHF ซึ่งต่อวงจรขยายเป็นวงจรพุชพูล สังเกตว่าเราใช้อุปกรณ์สตริปลายน์ (strip line) เป็นส่วนหนึ่งของวงจร สตริปลายน์ในที่นี้ มักทำเป็นลายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ (printed-circuit borad) เรามักพบสตริปลายน์ในวงจรขยายกำลังที่ทำงานระดับกำลังสูงมาก



รูปที่ 4 วงจรขยายกำลังคลาส C ในย่านความถี่ VHF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

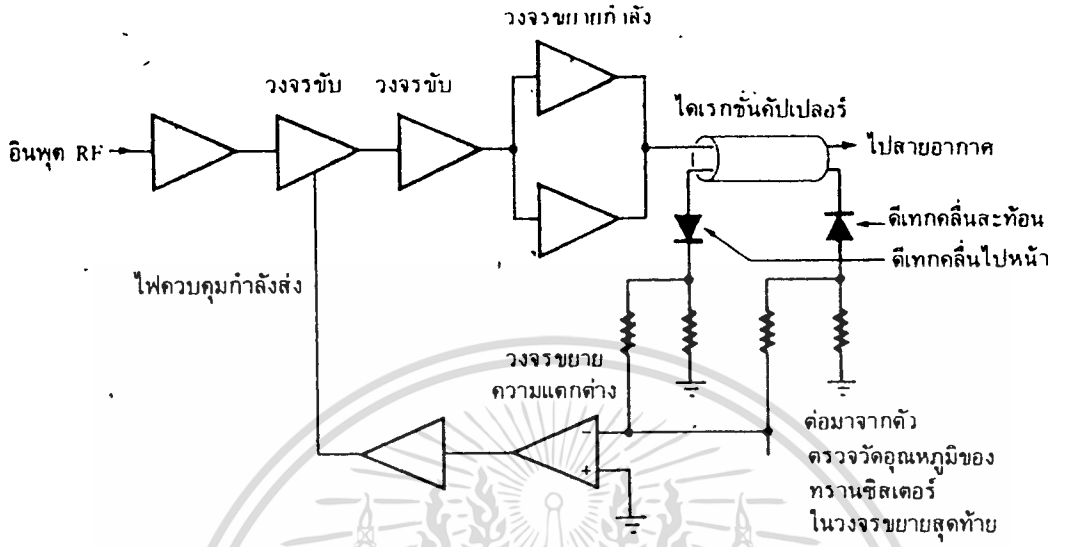


รูปที่ 5 วงจรขยายกำลังลิเนียร์ในย่านความถี่ UHF

ระบบป้องกันวงจรขยายกำลัง RF

โดยปกติภาคขยายกำลัง (นิยมเรียกว่า PA) ควรมีระบบป้องกันเพื่อควบคุมกำลังส่งให้คงที่ และป้องกันมิให้ทรานซิสเตอร์ภาคสุดท้ายชำรุด เพราะคลื่นสะท้อนกลับ (VSWR สูงเกินไป) รูปที่ 6 เป็นตัวอย่างระบบป้องกับของเครื่องขนาดกำลังส่ง 100 วัตต์ โดยสังเกตว่า ปริมาณสัญญาณเอาท์พุทตรวจวัด (sense) โดยใช้ไดเรกชั่นคัปเปลอร์ (directional coupler) ซึ่งอยู่ระหว่างอาร์มอนิกฟิลเตอร์กับสายอากาศ ถ้ากำลังส่งมากเกินไปหรือมีกำลังสะท้อนมากเกินไป คลื่นขับสู่ภาคขยายกำลังจะถูกบังคับให้ลดลง อย่างไรก็ตามการป้อนกลับจากไดโอดตัวที่ดีเทคคลื่นไปหน้า (forward) ของไดเรกชั่นคัปเปลอร์ก็จะทำให้กำลังส่งเพิ่มขึ้นไปจนกระทั่งถึงค่าที่กำหนดไว้ ส่วนไดโอดตัวที่ดีเทคคลื่นสะท้อนจะถูกควบคุมไว้ไม่เกินระดับหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 วงจรป้องกันภาคขยายกำลังสุดท้าย

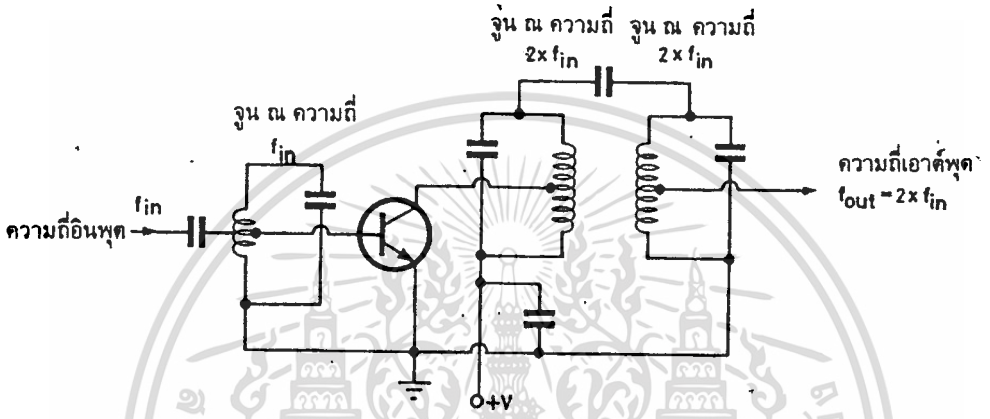
โดยทั่วไปวงจรป้องกันนี้เรานิยมใช้การตรวจวัดอุณหภูมิด้วยเสมอ ถ้าเครื่องส่งใช้งานหนักหรือการระบายความร้อนไม่ดีพอ ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ เช่นเทอร์มิสเตอร์จะบังคับภาคส่งให้หยุดส่งจนกว่าอุณหภูมิจะลดลง วงจรป้องกันบางชนิดใช้วิธีควบคุมหรือจำกัดกระแสที่ไหลในวงจร PA เพื่อเพลาการทำงาน

วงจรมัลติพลาย

วงจรมัลติพลาย เป็นวงจรขยายที่มีอินพุตขับด้วยสัญญาณแรงเต็มที่ และเอาท์พุทต่อเป็นวงจรที่จูนไว้ ณ ความถี่ฮาร์มอนิกของสัญญาณอินพุต วงจรนี้ก็เหมือน กับวงจรวงจรขยายจูนธรรมดา เพียงแต่ระดับสัญญาณอินพุตป้อนเข้าแรงกว่า และอุปกรณ์ที่ใช้ เช่น ทรานซิสเตอร์ ต้องทำงานในย่านความถี่สูงขึ้น การขับด้วยสัญญาณแรงเต็มที่ช่วยทำให้เกิดฮาร์โมนิกขึ้น ฉะนั้นความบริสุทธิ์ของสเปกตรัมเกี่ยวกับความถี่ของวงจรจึงมีความสำคัญมาก ในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นวงจรมัลติพลาย ซึ่งคูณความถี่เป็น 2 เท่า สังเกตว่าวงจรจูนด้านอินพุตจะจูนไว้ ณ ความถี่ที่ต้องการจะคูณ ส่วนด้านเอาท์พุทจูนไว้ ณ ความถี่ 2 เท่า หรือ ฮาร์โมนิกที่สอง (วงจรคูณ 3 เท่า เรียกว่า ทริปเลอร์) วงจรมัลติพลายส่วนใหญ่จะใช้ตัวคูณ 2 หรือ 3 เท่า เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวคูณสูงกว่านี้มักจะให้ประสิทธิภาพด้อยลง ถ้าเราต้องการคูณหลาย ๆ เท่า เราก็ใช้วงจรมัลติพลายหลาย ๆ ชุดมาต่อกัน



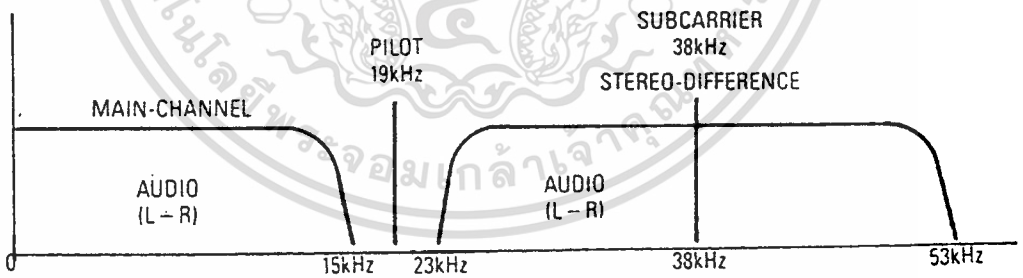
รูปที่ 7 วงจรดับเบลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การทำงานของเครื่องส่งเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์
F.M. STEREO MULTIPLEX TRANSMITTER

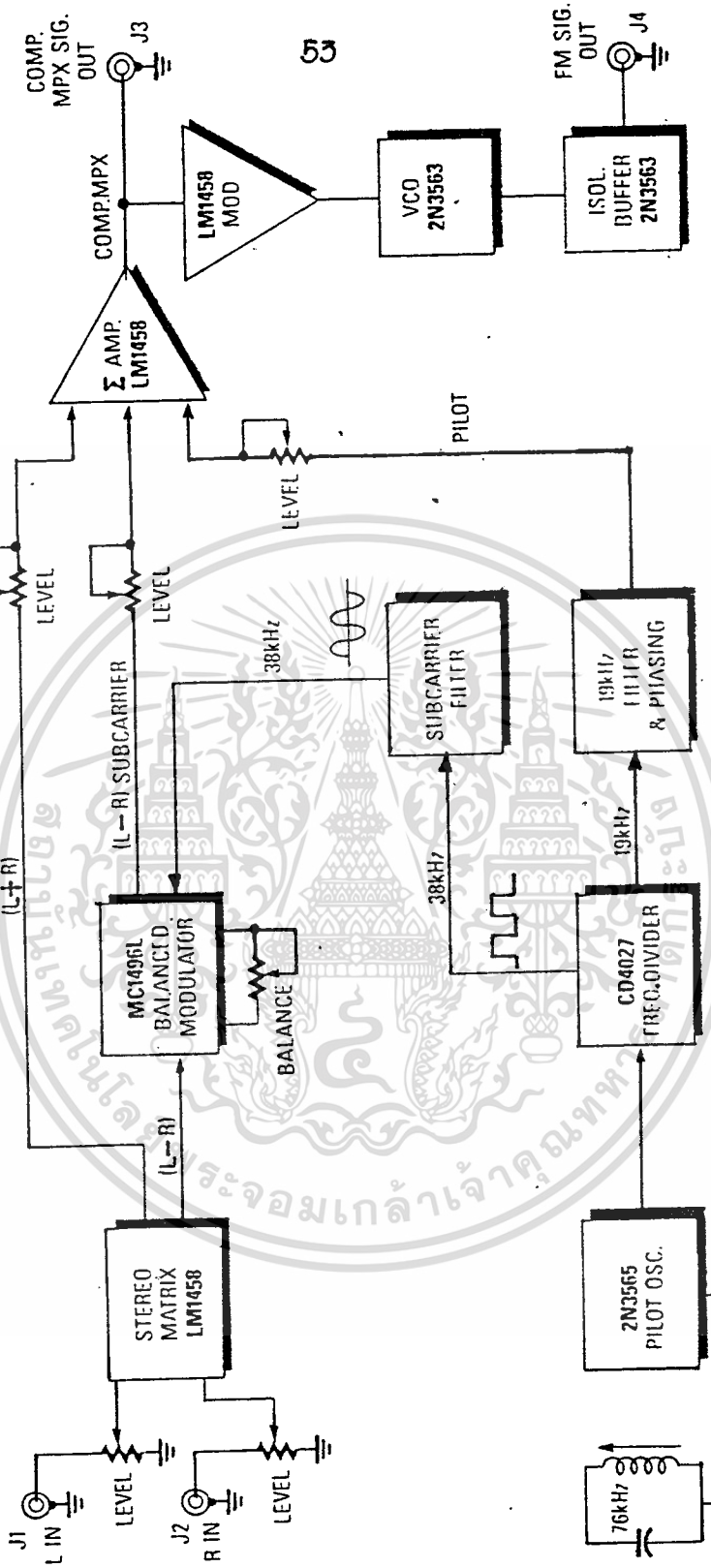
การส่งเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ จากสเปคตรัมความถี่ จะเห็นว่า ในส่วนของสัญญาณหลัก (main channel) เป็นสัญญาณเสียง (0 Hz-15 KHz) ที่ประกอบด้วยผลบวกระหว่างสัญญาณเสียงซีกซ้ายและสัญญาณเสียงซีกขวา (L+R) สัญญาณช่วงนี้ใช้สำหรับระบบการรับของเครื่องรับ F.M. ธรรมดาทั่วไป

ส่วนสัญญาณผลต่างสเตอริโอ (stereo difference channel) เกิดจากผลต่างของสัญญาณเสียงซีกซ้ายและสัญญาณเสียงซีกขวา (L-R) สัญญาน (L-R) นี้จะถูกม็อดกับคลื่นพาห์ย่อย (38 KHz) แล้วส่งรวมกันมากับสัญญาณหลัก ตามปกติแล้วคลื่นพาห์ย่อย (sub carrier) จะถูกซัพเพรส (suppress) ตามมาตรฐานทางเทคนิคที่ใช้ในการส่งระบบสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ของ FCC



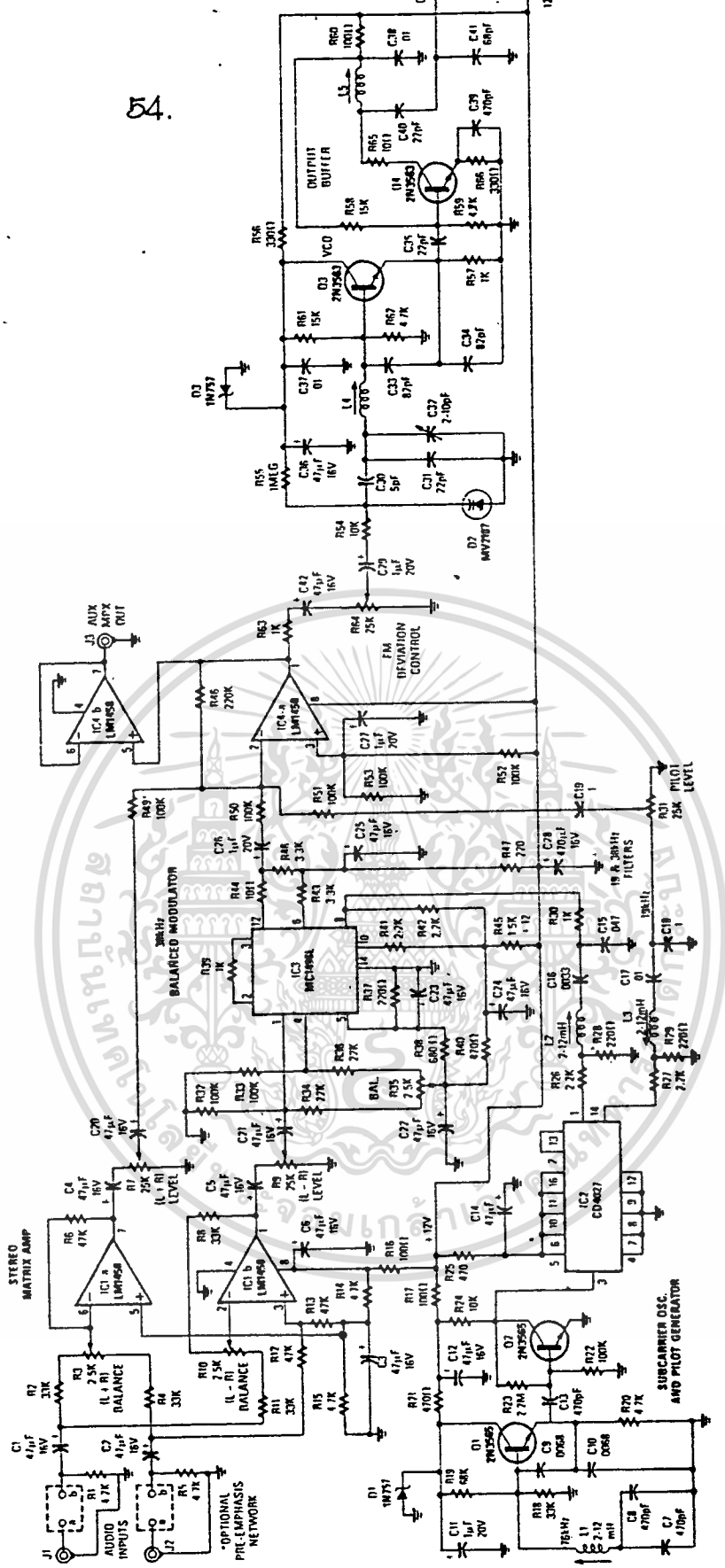
รูปที่ 1 แสดงสเปคตรัมความถี่ของสัญญาณเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ ซึ่งเป็นการส่งในระบบมัลติเพล็ก (MPX) ที่เครื่องรับเอฟ-เอ็มธรรมดาสามารถรับฟังได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 วงจรเครื่องส่งเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจากคลื่นพาห์ย่อยนี้ มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ในด้านเครื่องรับเพื่อการแยกสัญญาณสเตอริโอ จึงต้องมีการส่งสัญญาณไพล็อต 19 KHz รวมมากับเครื่องส่งด้วย โดยสัญญาณไพล็อตจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณความถี่ 38 KHz อีกครั้งทางด้านเครื่องรับ และสัญญาณไพล็อตนี้จะถูกส่งไปกับคลื่นส่งเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ของการม็อดสูงสุดทางด้านแอมปลิจูดเท่านั้น

จากบล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่ง F.M. สเตอริโอที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2 สัญญาณเสียงซีกซ้ายและขวา จะถูกป้อนเข้าไปยังวงจรเมทริคซ์ที่ทำงานด้วยไอซี LM 1458 ซึ่งเป็นไอซีที่ภายในประกอบด้วยออป-แอมป์ใน 2 ตัว ออปแอมป์ในไอซีตัวหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวบวกสัญญาณตามรูปแบบทางพีชคณิตเป็นการรวมรูปคลื่นของสัญญาณซีกซ้ายและซีกขวาเข้าด้วยกันสำหรับใช้เป็นสัญญาณหลัก (main channel) โดยที่เกนการขยายสัญญาณของแต่ละอินพุทเท่ากับ -1 ดังนั้น เอ้าท์พุทที่ได้จึงเท่ากับสัญญาณเข้าของแต่ละอินพุท และเอ้าท์พุทที่ได้นี้จะเป็นผลบวกทางพีชคณิต (L+R) ของสัญญาณเสียงซีกซ้ายและขวา

ส่วนอีกครึ่งหนึ่งของไอซี LM 1458 ซึ่งเป็นออป-แอมป์อีกตัวจะถูกจัดให้ทำหน้าที่เป็นตัวลบตามรูปแบบทางพีชคณิตของสัญญาณ L และ R เพื่อให้เกิดเป็นสัญญาณความแตกต่างสเตอริโอ (stereo difference channel) สัญญาณเข้าซีกขวาจะถูกนำไปลบกับสัญญาณเข้าซีกซ้ายในรูปของสัญญาณ (L-R) สังเกตได้ว่า สัญญาณทั้งสองเหมือนกัน สัญญาณออก (L-R) จะเป็นศูนย์

สัญญาน (L-R) จะถูกส่งเข้าไปยังวงจรบาลานซ์ ม็อดดูเลเตอร์ (balance modulator) ซึ่งทำงานด้วยไอซี MC 1496 และที่ม็อดดูเลเตอร์นี้จะเป็นการเอาสัญญาณ (L-R) ม็อดรวมเข้ากับคลื่นพาห์ย่อย 38 KHz ซึ่งเข้ามาอีกทางทั้งสัญญาณเสียง (L-R) และคลื่นพาห์ย่อยที่รวมกันเข้าด้วยกันจะถูกซัพเพรสด้วยไอซีตัวนี้ โดยจะมีเฉพาะสัญญาณคลื่นพาห์ย่อยที่รวมกับสัญญาณ (L-R) แล้วเท่านั้นที่ปรากฏออกไปเป็นสัญญาณเอ้าท์พุทของไอซี

การปรับแต่งบาลานซ์ (balance control) เป็นการจัดค่าไฟตรงบนตัวไอซีให้มีการซัพเพรสคลื่นพาห์ย่อย 38 KHz ออกให้ได้มากที่สุด (ถ้ามีสัญญาณเสียง (L-R) 1 KHz และคลื่นพาห์ย่อย 38 KHz เข้ามาผสมกันในขั้นตอนนี้ จะมีเฉพาะสัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ญาณรวม 37 และ 39 KHz เท่านั้น ที่ปรากฏทางเอ้าท์พุท ถ้ามีสัญญาณเสียง 10 KHz เข้ามา เราจะได้สัญญาณรวม 28 และ 48 KHz ปรากฏเป็นสัญญาณออกที่เอ้าท์พุท)

สัญญาณ 38 KHz นั้นได้จากวงจรกำเนิดความถี่ 76 KHz โดยใช้ไอซี CD 4027 ซึ่งมีฟลิบ-ฟลอปอยู่ภายในสองชุดเป็นตัวหารความถี่ลงมา ฟลิบ-ฟลอปชุดหนึ่งจะหารสองที่ความถี่ 76 KHz ลงมาเป็น 38 KHz และฟลิบ-ฟลอปอีกตัวหนึ่งจะหารสองที่ความถี่ 38 KHz ลงมาเป็นความถี่ 19 KHz สัญญาณ 38 KHz และ 19 KHz ทั้งคู่นี้ต่างก็เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งต้องให้มีการผ่านวงจรจูนเสียก่อนเพื่อเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณคลื่นรูปซายน์ (sine wave)

สัญญาณ L+R, สัญญาณคลื่นพาห์ย่อย L-R (L-R subcarrier), และสัญญาณไพล็อต 19 KHz จะถูกควบคุมระดับสัญญาณด้วยความต้านทานปรับค่าได้ เพื่อให้ได้ระดับสัญญาณที่ถูกต้องก่อนส่งไปเข้าวงจรขยายสัญญาณรวม เอ้าท์พุทที่ได้จะเป็นสัญญาณคอมโพซิส มัลติเพล็กซ์ (composite multiplex) (MPX) สัญญาณนี้จะถูกส่งเข้าไปม็อดกับคลื่นพาห์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศ โดยส่งเข้าไปที่วงจรโวลท์เตจ คอนโทรล ออสซิลเลเตอร์ (Voltage-Controlled Oscillator) (VCO) ซึ่งทำงานที่ความถี่ 27 MHz (VCO หมายถึง วงจรผลิตความถี่ที่สามารถควบคุมความถี่ได้ด้วยแรงดันควบคุม)

ที่จุดต่อแหล่งจ่ายไฟของวงจร VCO มีการเร็คกูเลทแรงไฟด้วยซีเนอร์ไดโอด และเอ้าท์พุทของ VCO จะต่อเข้ากับวงจรขยายบัฟเฟอร์ (buffer amplifier) ก่อนเป็นการกันวงจร VCO ออกจากจุดต่อสายอากาศ เพื่อต้องการให้ VCO ทำงานผลิตความถี่ได้อย่างมีเสถียรภาพ ความถี่จะได้ไม่เลื่อนไปมาโดยง่าย

รายละเอียดของวงจร จากวงจรที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3 จะเห็นว่าสัญญาณเสียงซิกซ้ายและขวาจะเข้ามาทาง J_1 และ J_2 โดยตัวคาปาซิเตอร์ C_1 และ C_2 จะทำหน้าที่ถ่ายทอดสัญญาณเสียงเข้าไปยัง R_3 และ R_4 ซึ่งเป็นตัวต้านทานขาเข้า (input resistance) ของสัญญาณ L+R และในขณะเดียวกันสัญญาณเสียงที่ถ่ายทอดผ่าน C_1, C_2 จะเข้ามายัง R_{11}, R_{12} ซึ่งเป็นตัวต้านทานขาเข้าของช่องสัญญาณ L-R ด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_3 เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ต่อระหว่าง R_2 และ R_4 ใช้สำหรับปรับแต่งให้อัตราส่วนเกนของสัญญาณ L และ R เท่ากันในอัตราส่วนของสัญญาณทั้งสองเท่ากับ 1 : 1

ในทางความคิดถ้า R_2 และ R_4 มีค่าเท่ากันจริงๆ R_3 จะต้องถูกปรับให้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางพอดี ส่วน R_6 เป็นตัวจัดให้วงจรขยายออป-แอมป์มีเกนขยายเท่ากับหนึ่ง (unity gain)

IC_1-b เป็นตัวขยายสัญญาณความแตกต่าง L-R มี R_8, R_{10} และ R_{11} ต่ออยู่ในรูปของเนทเวอร์คที่ปรับค่าได้ ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกันกับ R_2, R_3 และ R_4 สัญญาณซีกขวาจะถูกส่งผ่านเข้ามาโดยผ่านทาง R_{12} และ R_{13} เนทเวอร์คที่สร้างขึ้นจาก R_{14}, R_{15} และคาปาซิเตอร์ C_3 ใช้สำหรับให้ไบอัสที่ค่าครึ่งหนึ่งของแรงดันแหล่งจ่ายแก่ออป-แอมป์ทั้งคู่

เกนการขยายสัญญาณที่เข้ามาทางขานอนอินเวิทติง (ขา 3) ของ IC 1-b จะเท่ากับ 2 ถ้า R_{11} เท่ากับ R_8 โดยที่ R_{10} ตั้งอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลาง, R_{12} และ R_{13} จะเป็นตัวแบ่งครึ่งสัญญาณอินพุทที่เข้ามา ส่วน R_{10} เป็นตัวปรับแต่งเพื่อให้สัญญาณอินพุทซีกซ้ายและขวาเท่ากันจริงๆ(เมื่อใช้สายหนีบช็อตสัญญาณ L และ R เข้าด้วยกัน) สัญญาณออกของ IC-b(วัดคร่อม R_9)จะต้องเท่ากับศูนย์ ซึ่งในทางแนวความคิดแล้วเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องให้สัญญาณ (L-R) เท่ากับศูนย์ถ้าสัญญาณอินพุทของทั้งสองสัญญาณเท่ากัน

ดังที่ได้อธิบายมาก่อนแล้วว่า ทางด้านเครื่องส่งจะต้องกำเนิดสัญญาณไพล็อต 19 KHz และคลื่นพาห์ย่อย 38 KHz ในที่นี้ Q_1 เป็นตัวออสซิเลเตอร์ที่ให้สัญญาณเอ้าท์พุท 76 KHz ค่าความถี่ของวงจรหาได้จากเนทเวอร์คที่ประกอบขึ้นจาก C_7 - C_{10} และค่าอินดัคเตอร์ L_1 ซึ่งเป็นตัวปรับค่าได้เพื่อให้ได้ค่าความถี่ออสซิเลเตอร์ 76 KHz อย่างแท้จริง

สัญญาณออสซิเลเตอร์จะถูกส่งผ่าน C_{13} ไปยัง Q_2 ซึ่งเป็นตัวขยายบัฟเฟอร์ และ R_{22} - R_{24} เป็นตัวที่ให้ไบอัสแก่ Q_2 ในขณะที่ C_{12} และ R_{17} เป็นตัวกรองสัญญาณเพื่อขจัดความถี่ 76 KHz ออกจากสาย B+ ขบวนพัลส์ลบที่ขาคอลเลคเตอร์ของ Q_2 จะถูกส่งไปยัง IC_2 ซึ่งมีฟลิบ-ฟลอปอยู่ภายในสองตัว ตัวหนึ่งจะหารสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 76 KHz เป็นความถี่ 38 KHz ส่วนฟลิบ-ฟลอปอีกตัวจะหารสองที่ความถี่ 38 KHz อีกครั้งเป็นความถี่ 19 KHz สัญญาณความถี่ที่ได้เหล่านี้จะเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เนื่องจากว่าเราต้องการรูปคลื่นซายน์ จึงต้องมีวงจรกรองความถี่ฮาร์โมนิคเสียก่อนเพื่อให้ความถี่ฟันดาเม็นทัลเท่านั้นที่ผ่านวงจรกรองไปได้ โดยมีวงจรกรองอยู่สองชุด ชุด(L_2, C_{15}, C_{16}) สำหรับกรองความถี่ 38 KHz และชุด (L_3, C_{17}, C_{18}) สำหรับความถี่ 19 KHz, R_{30} จะเป็นตัวส่งผ่านคลื่นรูปซายน์ 38 KHz (ค่าประมาณ 1 V_{p-p}) เข้าไปยัง IC_3 ซึ่งเป็นม็อดดูเลเตอร์ R_{31} เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ใช้สำหรับควบคุมระดับสัญญาณไพล็อต 19 KHz ที่ผ่าน C_{19} ไปยังวงจรรวมสัญญาณ การปรับแต่งเลื่อนเฟสของสัญญาณไพล็อตและสัญญาณคลื่นพาห์ย่อยทำได้โดยการปรับที่ L_2 และ L_3

IC_3 ทำหน้าที่เป็นบาลานซ์ม็อดดูเลเตอร์ ที่ทำให้เกิดสัญญาณ (L-R) ซัพแคเรียร์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสัญญาณ MPX ที่เอ้าท์พุทของ IC_3 จะเป็นสัญญาณผลต่างและผลรวมของความถี่สองชุดที่เข้ามาเป็นอินพุทที่ขา 1 (สัญญาณเสียง L-R) และขา 8 (38 KHz) และ IC_3 จะทำงานโดยที่ไม่ให้สัญญาณอินพุทตัวหนึ่งตัวใดปรากฏออกไปทางขาเอ้าท์พุทโดยลำพังเพียงสัญญาณเดียว R_9 เป็นตัวควบคุมระดับสัญญาณเสียง (L-R) ที่ผ่าน R_{21} เข้าไปยังขา 1 ของ IC_3 ตัวต้านทาน R_{32} - R_{36} ต่อกันเป็นเนทเวอร์คที่ใช้ในการปรับค่าดีซีไบอัส C_{22} ที่ต่อกับขากลางของ R_{35} เป็นตัวให้สัญญาณ AC ผ่านลงกราวน์ไป R_{44} เป็นตัวต้านทานที่ช่วยในการจัดระดับสัญญาณมีค่าประมาณ 10 โอห์ม ซึ่งค่านี้อาจเพิ่มให้สูงขึ้นได้ถึง 2.2 K ถ้าระดับสัญญาณที่ขา 12 ของ IC_3 มีค่าสูงขึ้น สังเกตได้ว่าค่า R_{43} จะมีค่ามากน้อยไปไม่เกินกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของค่ารวมระหว่าง R_{44} และ R_{45}

IC_4 เป็นวงจรเอ้าท์พุทที่มีเกนการขยายสัญญาณรวมเท่ากับสองมี R_{52}, C_{27} และ R_{53} เป็นตัวให้ไบอัสแก่ออป-แอมป์ที่ค่าครึ่งหนึ่งของแรงดันจ่ายไฟ สัญญาณเสียง L+R จากขากลางของ R_7 จะส่งผ่าน C_{20} มายัง R_{49} สัญญาณคลื่นพาห์ย่อย L-R จะส่งผ่าน C_{26} มายัง R_{50} และสัญญาณไพล็อตจาก R_{31} จะผ่านมายัง R_{51} สัญญานทั้งสามจะถูกขยายเป็นสัญญาณรวมออกทางขา 1 ของ IC_4 ที่ IC_{4-b} เป็นจุดสัญญาณออก AUX เพื่อใช้เป็นจุดทดสอบสัญญาณ MPX ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ MPX จะถูกส่งผ่าน C_{29} และ R_{54} มายังวาเรคเตอร์ไดโอด D_2 (คาปาซิเตอร์ที่เปลี่ยนค่าไปตามโวลท์เตจ) ทรานซิสเตอร์ Q_3 และอุปกรณ์อื่นๆ ต่อร่วมกันเป็นวงจรโคลพิทส์ออสซิเลเตอร์ทำงานสร้างความถี่ที่ 27 MHz

สัญญาณคอมโพซิส MPX จาก R_{54} จะถูกส่งเข้าไปม็อดที่ D_2 ซึ่งเป็นตัวจูนม็อดดูเลทของออสซิเลเตอร์ R_{54} เป็นตัวควบคุมระดับสัญญาณที่เข้าไปม็อดเพื่อให้ความถี่ออสซิเลเตอร์เบี่ยงเบนได้สูงสุด $\pm$ 75 KHz จากค่าสัญญาณซีกซ้ายและขวาที่เข้าไปม็อดซึ่งมีค่าประมาณ 0.5 $V_{(p-p)}$

D_2 ต่อเชื่อมกับวงจรออสซิเลเตอร์โดยการต่อผ่าน C_{30} เมื่อทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์ของ D_2 เปลี่ยนแปลงไป จะเป็นการม็อดดูเลทสัญญาณลงบนความถี่ที่ได้จากวงจรออสซิเลเตอร์ Q_3 ซึ่งมี C_{32} เป็นตัวปรับแต่งให้ได้ความถี่แถว ๆ 27 MHz

ทรานซิสเตอร์ Q_4 เป็นบัฟเฟอร์ที่มีจุดประสงค์ในการกันออสซิเลเตอร์ (Q_3) จากผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่อาจจะมีสาเหตุมาจากสายอากาศ R_{66} จะเป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดการออสซิเลทความถี่ UHF ที่ไม่ต้องการ L_5, C_{40} และ C_{41} เป็นวงจรแมทชิ่งสำหรับโหลด 50 โอห์มทางเอ้าท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรทวีความถี่ และ วงจรขยายกำลัง RF

Inputของวงจรในส่วนนี้จะใช้หลักการทวีความถี่ เนื่องจากวงจร VCO นั้นเป็นวงจร modulated แบบ VOF โดยใช้วงจร coillator ซึ่งให้กำลังของ RF ต่ำมากเพียงแค่ 0.25 มิลลิวัตต์ ทำให้ต้องทำวงจรขยายหลาย stage ซึ่งยากและวุ่นวายในการสร้างวงจรขยาย ฉะนั้นแล้วเราจึงออกแบบให้วงจร colpitts oscillator ซึ่งModulate กับ composite signal ได้เป็น Frequency Modulated มีความถี่ต่ำ ในกรณีนี้ให้มีความถี่ประมาณ 27 MH_z แล้วส่งให้วงจรทวีความถี่ วงจรจะทวีความถี่เป็น 2 เท่า พร้อมทั้งAmplify RF signal เมื่อผ่าน stage แรก จะเป็น 54 MH_z แล้ว ส่งผ่านให้วงจร stage ที่ 2 ก็จะทวีความถี่เป็น 108 MH_z พร้อมทั้งขยาย RF signal ให้มีกำลังสูงขึ้น เมื่อได้ความถี่ Final ที่ต้องการแล้วจะส่งผ่านให้วงจรขยายกำลัง RF ซึ่งต่อแบบ class C ซึ่งให้ power สูง สาเหตุที่ใช้วงจร VFO ในการ modulate เนื่องจากว่าวงจร VFO จะให้ Bandwidth ในการเบี่ยงเบนสูงกว่า วงจร VXO มากแต่วงจร VFO มีความเที่ยงตรงความถี่น้อยกว่าวงจร VXO เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ววงจร VFO จะให้ B.W ดีกว่า ส่วนความเที่ยงตรงของความถี่นั้น เราสามารถเลือกวงจร oscillator ที่มีความเที่ยงตรงสูงได้

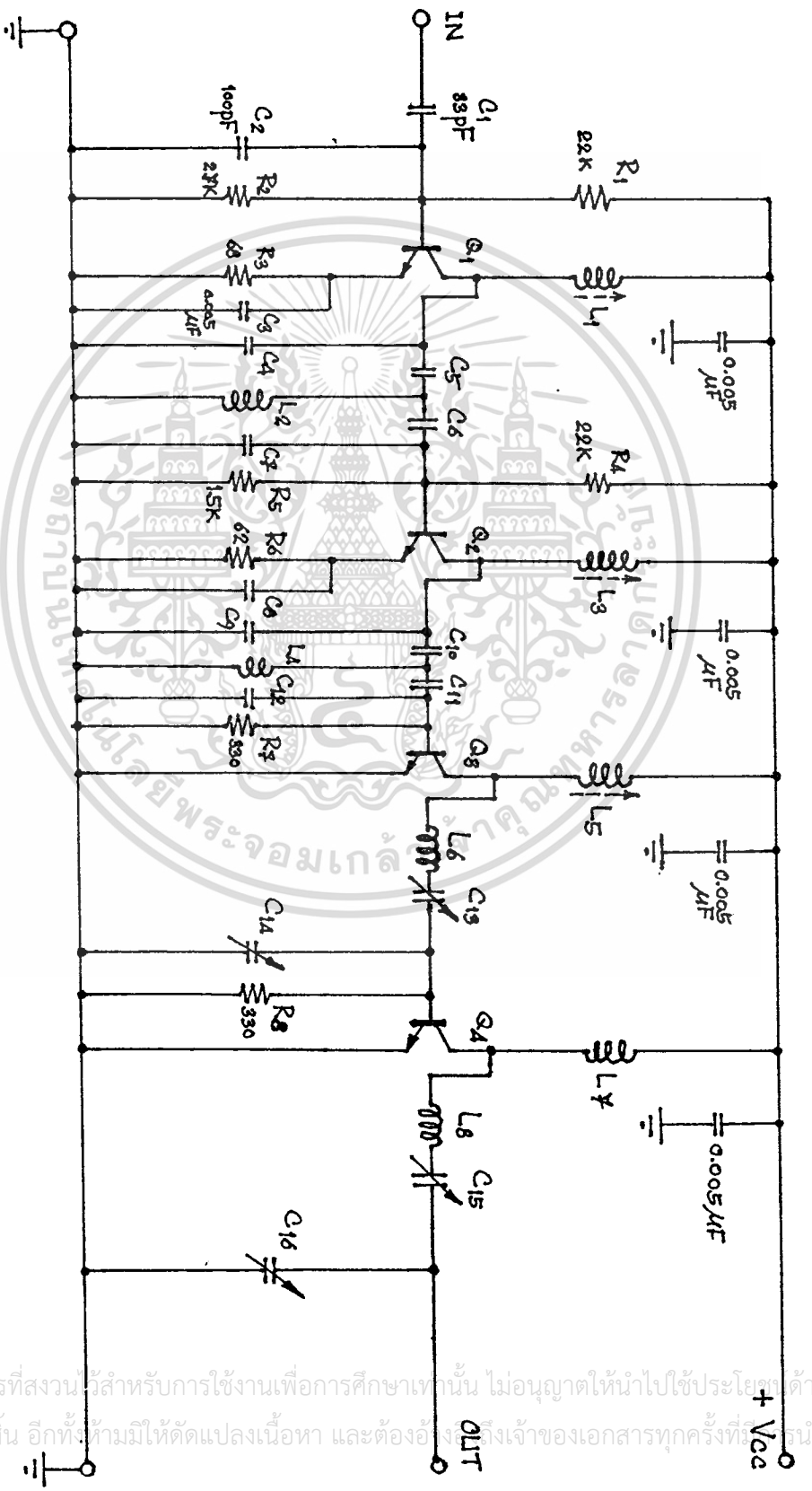
คราวนี้เรามาดูวงจรกันจากวงจรในส่วนแรก C_1 และ C_2 เป็นส่วนการ couple ของ RF signal จากวงจร oscillator ผ่านเข้ามาวงจรทวีความถี่ โดยที่ R_1 และ R_2 เป็น Resistor ที่ Set BIAS ให้กับ transistor Q_1 โดยมี R_3 และ C_3 เป็นตัวช่วยให้ Q_1 มีเสถียรภาพที่มั่นคง และ L_1 กับ C_4 จะ tuned เอา Harmonic ที่เราต้องการจาก stage นี้ไว้โดย stage นี้ เรา set ให้มี Harmonic ความถี่ประมาณ 54 MH_z เนื่องจากวงจรใน stage นี้เป็นวงจร Amplify แบบ class A ทำให้ RF Signal ถูกขยายให้มี power สูงขึ้นด้วย ผ่านเข้าวงจร matching โดยมี C_5, L_2 กับ C_6 ต่อกับแบบพายเพื่อให้ matching กันระหว่าง stage แรก กับ stage ที่ 2 เมื่อถึง stage ที่ 2 R_4 และ R_5 เป็นตัว Set BIAS ให้กับ Q_2 โดยมี R_6 และ C_8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นตัวทำให้เสถียรภาพของ transistor Q_2 มีเสถียรภาพที่ดี และมีวงจร tuned จาก L_3 กับ C_3 โดยวงจร tuned จะtuned ให้ Harmonic ที่ความถี่ 108 MH_z ผ่าน ซึ่งเป็นการ tuned ให้ทวีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ที่ส่งผ่านมาจาก stage แรก โดยมี C_{10}, L_4 กับ C_{11} เป็น matching ระหว่าง stage ความถี่ 108 MH_z นี้เป็น Final ความถี่ที่ต้องการ ฉะนั้นแล้ว stage วงจรถัดไปเป็นวงจรขยายกำลังของ RF โดยที่ Q_3 จะถูก Set BIAS ให้แบบ class C เพื่อที่ให้มี power สูง ส่วน L_6 กับ C_{13} เป็นวงจร tuend มีหน้าที่ป้องกัน Harmonic ที่ไม่ใช่ความถี่ที่ต้องการผ่านออกไป power ที่ผ่านจาก Stage นี้มีค่าสูงไม่พอตามที่ต้องการจึงต้องผ่านวงจรขยายกำลังอีกหนึ่ง stage ซึ่งจะถูกขยายกำลังโดย Q_4 ซึ่งต่อแบบ class C ไว้เช่นกัน โดยมี L_8, C_{15} กับ C_{16} เป็นวงจร tuned เพื่อป้องกัน Harmonic ที่ไม่ต้องการผ่านออกอากาศไป พร้อมทั้งวงจร tuned ยังเป็น matching Impedance ให้กับ output ของวงจรขยายกำลังนี้ ซึ่งมี Impedance 50 โอมห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแสดง วงจรทวีความถี่ และ วงจรขยายกำลัง RF



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างภาคทวีคูณความถี่ และ ภาคขยายกำลัง RF

การสร้างวงจรในส่วนนี้ต้องใช้เครื่องมือหลายชนิด เช่น Frequency counter, Frequency generator, Watt meter เป็นต้น เมื่อประกอบวงจรเสร็จตามวงจรที่ให้มา จะต้องทำการปรับจูนเสียก่อน โดยเราจะต้องป้อน ความถี่ 27 MHz จาก generator เข้าวงจรโดยมี power น้อย ๆ แล้วใช้ Frequency counter จับที่ C_6 แล้วทำการปรับจูน coil และcapacitorให้มีความถี่ 54 MHz หรือใกล้เคียงที่ C_6 และจึงนำ Frequency counter มาจับที่ C_{11} อีกครั้งโดยจะปรับจูน Coil L_3 กับ Capacitor C_9 ให้มีความถี่ที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของความถี่ 54 MHz เป็นความถี่ 108 MHz หรือใกล้เคียง stage ของภาค output ซึ่งขยายกำลังนั้นจะถูกต่อด้วย watt meter กับ Dummy load 50 โอห์ม คราวนี้เราจะต้องสังเกตที่ Watt meter ว่ามีการกระดิกขึ้นเข็มชี้หรือไม่ถ้าไม่มีหรือมีน้อยจะต้องปรับ coil และ Capacitor C_{13} กับ L_8 และ C_{15} และ C_{16} โดยจะต้องปรับให้มี power ออกมาสูงที่สุด สังเกตได้จาก watt meter ในการสร้างนั้นปัญหาที่สำคัญ และต้องระมัดระวังคือ เรื่องการพันขดลวด (coil) เนื่องจากถ้าพันเกินหรือผิดไปหนึ่งรอบ ก็จะทำให้วงจรทำงานผิดพลาดทั้งหมด ก็เป็นไปได้ ในภาคขยายกำลัง transistor จะต้องติด Heat sink เพื่อระบายความร้อนให้ transistor และการเลือกซื้อ Capacitor จะต้องเลือกชนิดที่มีคุณภาพเช่น แบบ silver MICA ซึ่งมีราคาแพง และส่วนที่สำคัญในการช่วยทำให้เครื่องส่งมีประสิทธิภาพสูง คือ power supply ซึ่ง power supply จะต้องเรียบให้มี ripple น้อยสุด เพื่อป้องกันการรบกวนจากภาค power supply เนื่องจากภาค power supply ไม่เรียบเพราะ Filter ไม่เพียงพอทำให้มีเสียงฮัมออกอากาศไป และอาจทำให้เกิด self oscilation ได้ ทำให้มีการรบกวนกันเกิดขึ้น วงจร RF นั้นมีความละเอียดในการสร้างมากรวมทั้ง อุปกรณ์ที่นำมาประกอบจะต้องมีคุณภาพ ปัญหาที่สำคัญ คือ การพัน L การพันให้ coil มีค่าตาม Henry ที่ต้องการนั้นมีความยากลำบากพอสมควร ฉะนั้นอาจจะต้องพันใหม่อยู่บ่อย ๆ เนื่องจากการพันที่ไม่ละเอียดพอ รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างมีข้อจำกัด มีความถี่ในการวัด เป็นต้น เมื่อปรับแต่งเรียบร้อย ให้ทดลองส่งออกอากาศ โดยต่อ output กับสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ 4 แล้วป้อน Signal ซ้ายและขวา และปรับความถี่ที่เครื่องรับให้มีความถี่ที่ตรงกับความถี่ที่ส่ง จะต้องเป็นระบบ stereo และไฟ pilot จะต้องติด ซึ่งแสดงถึงเป็นระบบ stereo และถ้ามีเสียงฮัมรบกวนในเครื่องรับให้ลองเปลี่ยน Supply จาก requlated มาเป็น Battery แล้วทดลองใหม่ถ้าเสียงฮัมหายก็แสดงว่าภาค Supply มี ripple สูงจะต้อง filter พร้อมชีลด์ให้ดี ถ้าไม่หายแสดงว่าวงจรทวีความถี่และวงจร modulated ช่วงต้นมีปัญหาเกี่ยวกับ noise ให้กลับไปตรวจสอบดูใหม่อีกครั้ง ควรใช้ scope ในการตรวจเพื่อจะได้เห็นว่า noise เกิดจากจุดไหนกันแน่ แล้วจึงทำการแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทดลองและผลการทดลอง

1. ต่อสัญญาณเสียง 1 KHz ขนาดสัญญาณ 0.5 โวลท์ P-P เข้าที่ J_1 ปรับ R_7, R_9, R_3 และ R_{10} ไว้ที่จุดกึ่งกลาง และปรับ R_{31} ให้อยู่ในตำแหน่งต่ำสุด ต่อสโคปวัดระดับสัญญาณเสียงเข้าที่จุดต่อของ C_4 และ R_7 ให้สังเกตว่าระดับสัญญาณเสียงที่วัดได้ จะต้องใกล้เคียงกับระดับสัญญาณทางอินพุท

จากนั้นให้ย้ายเอาสัญญาณเสียง 1 KHz ไปเข้าที่ J_2 ระดับสัญญาณที่วัดได้จะต้องเท่ากันกับเมื่อป้อนเข้าทาง J_1 ถ้าไม่เท่ากันให้ปรับ R_3 จนกระทั่งเท่ากัน ในการนี้ตำแหน่งการปรับ R_3 ควรจะอยู่ใกล้เคียงจุดกึ่งกลาง

2. ต่อสโคปหรือมิเตอร์วัดระดับสัญญาณเข้าที่จุดต่อของ C_5 และ R_9 และต่อสัญญาณเสียง 1 KHz เข้าที่ J_1 (ซีกซ้าย) ระดับสัญญาณที่วัดทางเอ้าท์พุทจะต้องใกล้เคียงกับที่เข้าทางอินพุท ตอนนี้ให้ย้ายสัญญาณ 1 KHz ไปเข้าที่ J_2 ระดับสัญญาณที่วัดได้ทางเอ้าท์พุทควรจะเท่ากับทางอินพุท ต่อจากนั้นให้จั้มป์สายอินพุทซ้าย-ขวาเข้าด้วยกัน ซึ่งเท่ากับว่ามีสัญญาณ 1 KHz เข้ามาทางอินพุททั้งสอง ตอนนี้ระดับสัญญาณทางเอ้าท์พุทจะตกลงมาเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์ ให้ปรับทาง R_{10} เพื่อให้ค่าทางเอ้าท์พุทต่ำสุดเป็นศูนย์ได้จะดีมาก ถ้ามีปัญหาให้ตรวจสอบที่ IC_1 ซึ่งเป็นวงจรเมททริคซ์สัญญาณเสียง

3. ต่อเครื่องวัดความถี่เข้าที่ขาคอลเลคเตอร์ของ Q_2 แล้วปรับ L_1 จนอ่านค่าความถี่ได้ 76.000 KHz

4. ปรับ R_{31} ไปครึ่งทางและต่อสโคปวัดระดับสัญญาณไปยังจุดต่อของ R_{31} และ C_{19} ปรับสลักจูนของ L_3 ให้ได้เอ้าท์พุท 19 KHz ออกมากที่สุด

5. ต่อสโคปวัดระดับสัญญาณไปยังจุดต่อของ C_{26} และ R_{60} ปรับ R_{36} ไปจนสุดข้างใดข้างหนึ่งชั่วคราว อินพุทสัญญาณเสียงจะเป็นศูนย์ ปรับ R_3 ลงต่ำสุดและปรับ L_2 ให้ได้เอ้าท์พุทออกสูงสุด ต่อไปค่อยๆ ปรับ R_{36} อย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้มีสัญญาณออก (null) ทางเอ้าท์พุท จุดนี้อาจจะอยู่ใกล้จุดกึ่งกลางหรือลึกลงไปในที่หนึ่งที่ใดของ R_{36} ถ้ายังคงมีสัญญาณออกให้ตรวจสอบ IC_3 และอุปกรณ์ร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ปรับ R_9 กลับไปที่จุดกึ่งกลาง เอาสัญญาณเสียง 1 KHz เข้าทางอินพุทซ้ายและขวาโดยต่อสโคปแสดงสัญญาณที่จุดต่อของ R_{50} และ C_{26} ถ้าอินพุทซ้ายและขวาถูกต่อสัญญาณเข้าพร้อมกันและเป็นสัญญาณเสียงอันเดียวกันจะไม่มีสัญญาณออกที่เอ้าท์พุทให้ปรับ R_{35} อีกครั้งถ้าจำเป็น และต่อจากนั้นให้ปรับ R_9 กลับมาที่ศูนย์

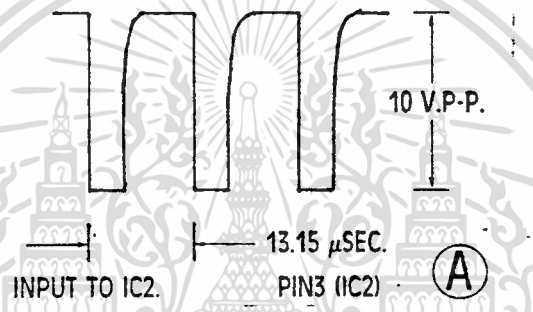
7. ปรับ R_7 ไปประมาณ 1/3 ของด้านสูงสุด, ปรับ R_9 ไปประมาณ 1/4 ของด้านสูงสุด, ปรับ R_{31} ไปประมาณครึ่งทาง, และปรับ R_{64} ไปประมาณ 1/3 ของด้านสูงสุด จากนั้นหมุนหาสถานีทางเครื่องรับวิทยุเอฟ-เอ็ม สเตอริโอไปที่สถานีที่เราส่งออกอากาศ ตั้งปุ่มเครื่องรับไว้ที่โมโน แล้วต่อสัญญาณเสียงสเตอริโอเข้าทางอินพุทซ้ายและขวาของเครื่องส่ง ปรับ C_{32} จนกระทั่งรับฟังสัญญาณที่ออกอากาศจากเครื่องส่งได้

8. ปรับ R_{64} จนได้ความดังบนเครื่องรับวิทยุ FM พอๆ กับสถานีวิทยุอื่นๆ ผลักสวิทช์เครื่องรับ FM ไปที่ตำแหน่งสเตอริโอ แล้วปรับ R_{31} ซึ่งเป็นตัวตั้งระดับสัญญาณไพล็อต, จนกระทั่งไฟแสดงสัญญาณสเตอริโอบนเครื่องรับสว่างขึ้น และให้ปรับ R_{31} ไปอีกประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ถ้าไฟสัญญาณสเตอริโอยังไม่สว่างให้ตรวจที่ขั้นตอนการปรับแต่งความถี่ 76 KHz ของ Q_1 จากนั้นให้ลองปรับ R_{31} อีก ในตอนนี้เราจะสามารถรับฟังเสียงสเตอริโอจากเครื่องรับได้แล้ว

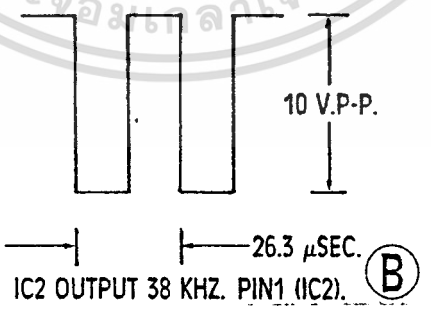
9. ปรับที่ R_9 และต่อไปก็ปรับที่ L_3 เพื่อให้มีการแยกสัญญาณสเตอริโอได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นในการปรับแต่งจุดต่างๆ ของวงจร

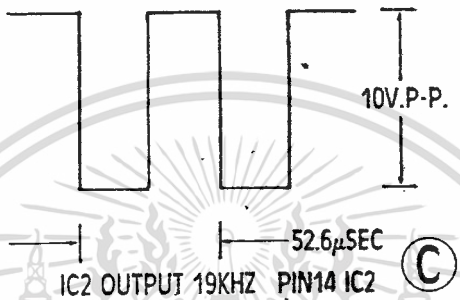


รูปคลื่นที่ขา 3 ของ IC_2 เป็นสัญญาณอินพุทที่เข้ามายัง IC_2

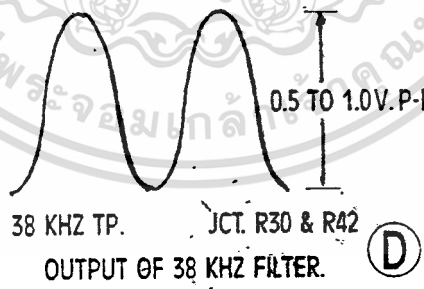


รูปคลื่นที่ขา 1 ของ IC_2 เป็นสัญญาณ 38 KHz ที่ออกจาก IC_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

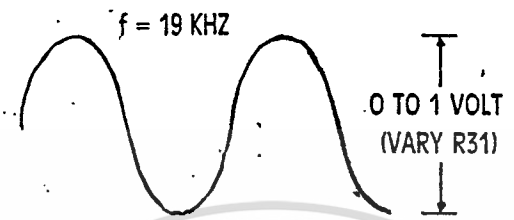


รูปคลื่นที่ขา 14 ของ IC_2 เป็นสัญญาณ 19 KHz ที่ออกจาก IC_2



รูปคลื่นที่จุดต่อระหว่าง R_{30} และ R_{42}
เป็นสัญญาณ 38 KHz ที่ผ่านวงจรฟิลเตอร์แล้ว

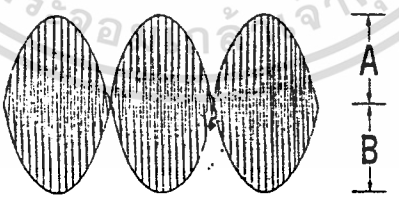
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



19 KHZ TP. JCT. R31 & C19
PILOT CARRIER FROM R31 (E)

รูปคลื่นที่จุดต่อระหว่าง R_{31} และ C_{19} เป็นสัญญาณไพล็อต 19 KHz ที่ออกจาก R_{31} (จุดทดสอบสัญญาณ 19 KHz) เมื่อมีการปรับ R_{31} โวลท์เตจของสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0-1 โวลท์(P-P)

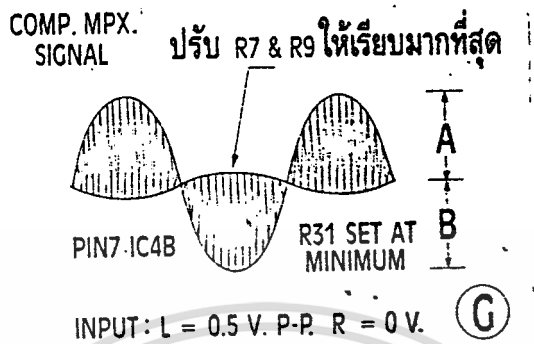
JCT. C26 & R50 A = B = 0.3 TO 1.0 V.



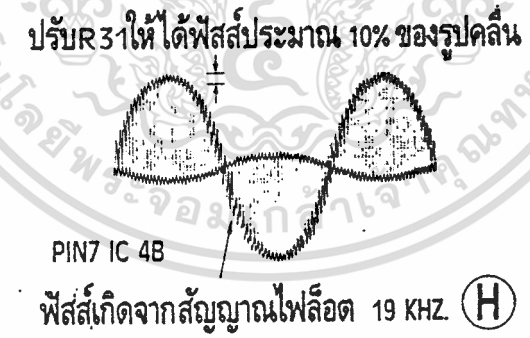
INPUT: L = 1 KHZ 0.5 V. P-P R = 0 V.
BALANCED MODULATOR OUTPUT (F)

รูปคลื่นที่จุดต่อระหว่าง C_{26} และ R_{50} ป้อนสัญญาณชายน์ทางอินพุท L = 1 KHz 0.5 V_{p-p} ทางอินพุท R = 0 V (ช็อตลงกราวน์) ปรับ R_{35} ให้ค่า A = B = 0.3 V - 1 $V_{(p-p)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



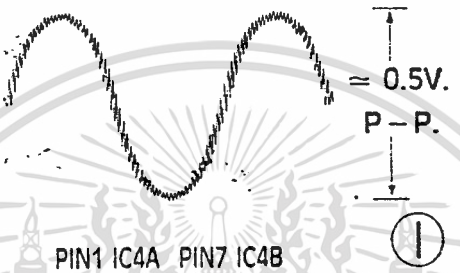
รูปคลื่นที่ขา 7 IC_{4b} (ขณะไม่มีสัญญาณไพล็อต 19 KHz) ป้อนสัญญาณซายน์ทางอินพุท L = 1 KHz 0.5 V_{p-p} ทางอินพุท R = 0 V. (ช็อตลงกราวน์) ปรับลด R_{31} ลงต่ำสุด เพื่อไม่ให้มีสัญญาณไพล็อตเข้ามา ปรับ R_{32} (บาลานซ์) ให้ค่า A = B ค่า A = B = ค่านี้อาจขึ้นถึง 1 V_{p-p} ไม่ใช่ค่าตายตัวขึ้นกับสัญญาณเสียงโทน 1 KHz ที่ป้อนเข้าทางอินพุท L



รูปคลื่นที่ขา 7 IC_{4b} (ขณะมีสัญญาณไพล็อต 19 KHz) ป้อนสัญญาณซายน์ทางอินพุท L = 1 KHz 0.5 V_{p-p} ทางอินพุท R = 0 V. (ช็อตลงกราวน์) การป้อนสัญญาณเช่นเดียวกับรูป G ต่างกันที่มีการปรับ R_{31} ให้ปล่อยสัญญาณไพล็อต 19 KHz เข้ามาจะปรากฏเป็นพัลส์ (FUSS) ขึ้นบนรูปคลื่นเดิม ปรับ R_{31} ให้พัลส์มีค่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของรูปคลื่นเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INPUT : L = R = 1 KHZ 0.5V. P–P.



รูปคลื่นที่ขา 7 IC_{4b} และที่ขา 1 IC_{4a} (INPUT L = R) ป้อนสัญญาณซายน์ 1 KHz 0.5 V_{p-p} เข้าทางอินพุท L และ R มีข้อปฏิบัติต่างกับรูป H ตรงที่คราวนี้มีการป้อนสัญญาณซายน์ค่าเดียวกันเข้าทั้งอินพุท L และอินพุท R (จั้มป์ขาอินพุท L และ R เข้าด้วยกันแล้วป้อนสัญญาณเข้า)

ทั้งรูป G, H, และ I ต่างก็เป็นรูปคลื่นที่ขา 7 IC_{4b} ด้วยกัน ซึ่งเป็นจุดออกของสัญญาณมัลติเพล็กซ์คอมโพซิส (COMP.MPX.SIGNAL) ในรูป G เป็นรูปคลื่นที่ไม่มีสัญญาณไพล็อต 19 KHz รวมอยู่ด้วย ในรูป H เป็นรูปคลื่นที่มีสัญญาณไพล็อตเข้ามาผสม ส่วนรูป I เป็นรูปคลื่นที่เกิดจากการป้อนสัญญาณโทนรูปซายน์ค่าเดียวกันเข้าทางอินพุทสัญญาณเสียง L และ R เป็นผลให้แอมปลิจูดของสัญญาณแคเรียร์ 38 KHz ในรูปคลื่นสัญญาณคอมโพซิสกลายเป็นศูนย์หรืออีกนัยหนึ่งคือสัญญาณแคเรียร์ 38 KHz จะหายไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

จากเครื่องต้นแบบที่ทดลองสร้างขึ้นพบว่าเมื่อทำการปรับจูนเครื่องจนได้ที่ดีแล้ว สามารถทำการส่งกระจายเสียงออกอากาศในระบบเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ได้เป็นอย่างดี ภาคส่งปรับจูนเลือกความถี่ที่ 108 MHz ออกอากาศ คุณภาพเสียงที่รับฟังได้จากทางเครื่องรับคมชัด มีเสียงฮัมบ้าง (เนื่องจากสัญญาณไฟ AC) คุณภาพในการมัลติเพล็กซ์สัญญาณซ้าย-ขวาอยู่ในขั้นดีมาก สามารถแยกได้เด็ดขาด การทดลองง่ายๆ ที่บ่งบอกให้ทราบถึงคุณภาพในการมัลติเพล็กซ์สัญญาณซ้าย-ขวาของเครื่องส่งนี้ก็คือ เมื่อเราทดลองป้อนเฉพาะสัญญาณซีกซ้ายให้กับเครื่องส่ง ทางเครื่องรับจะสามารถรับฟังได้เฉพาะซีกซ้ายเท่านั้น ได้ลองเปิดเครื่องรับให้ดังมากพอสมควรแล้วลองแนบหูเข้ากับหน้าลำโพงซีกขวาปรากฏว่าแทบจะไม่ได้ยินเสียงสัญญาณซีกซ้ายรั่วออกทางลำโพงซีกขวาเลย เมื่อทดลองป้อนเฉพาะสัญญาณซีกขวาก็ได้ผลทำนองเดียวกัน

การป้อนสัญญาณจากไมโครโฟนเข้าทางอินพุทสัญญาณเสียงของเครื่องส่งชุดนี้โดยตรงอาจจะไม่ได้ผลเท่าที่ควรเพราะระดับความแรงสัญญาณไม่เพียงพอ ต้องป้อนสัญญาณผ่านภาคขยายขั้นต้นหรือภาคปรีแอมป์ก่อน

รัศมีการส่งกระจายเสียงของเครื่องส่งชุดนี้มีระยะไกลพอสมควร คือประมาณ 1 กิโลเมตร เนื่องจากภาคส่งมีกำลังส่งสูงสุดประมาณ 0.5 วัตต์ ดังนั้น เวลาส่งจึงอาจจะไปรบกวนสถานีที่ส่งปกติอยู่แล้วได้ จึงควรระมัดระวังเนื่องจากการสร้างและส่งกระจายเสียงนี้ผิดกฎหมาย เพราะฉะนั้น แนวทางของวงจรเครื่องส่งเอฟ-เอ็ม สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ชุดนี้จึงเน้นที่การศึกษาระบบมัลติเพล็กซ์สัญญานหรือใช้ในการตั้งเป็นสถานีแม่ในการออกไปทัศนศึกษา, ท่องเที่ยวเพื่อแจ้งข่าวสารไปยังผู้ที่อยู่ในความควบคุมได้ทราบ หรืออาจจะใช้ในห้องประชุมขนาดใหญ่ได้ มิได้หวังเพื่อการค้าหรือรบกวนผู้อื่นให้ได้รับความเดือดร้อน

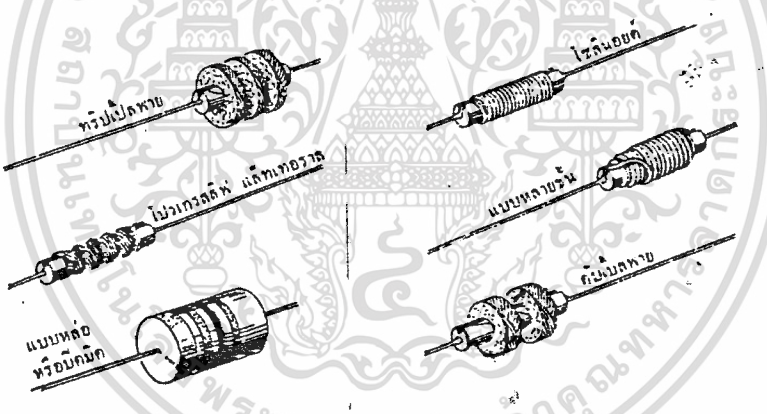
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โช้คความถี่สูง

โช้คความถี่สูง คือ ขดลวดที่ใช้กับความถี่ ถ้าจะว่ากันตามความหมายของคำภาษาอังกฤษแล้ว *โช้ค* (choke) ก็หมายความถึงการสะกัดไว้ ถ้าเรียกกันเต็มหน่อยว่า *อาร์เอฟโช้ค* (RF chock, radio frequency chock) โดยทั่วไปก็จะหมายถึง ขดลวดสำหรับใช้ป้องกันสัญญาณความถี่วิทยุไม่ให้ผ่านไป ในขณะเดียวกันก็ลำเลียงปล่อยให้สัญญาณกระแสตรงและสัญญาณความถี่ต่ำ เช่น สัญญาณเสียงผ่านไปได้ ซึ่งวงจรที่ทำหน้าที่นี้ ก็จะเรียกว่า *วงจรดีคัปปลิ้ง* (decoupling)



รูปที่ 1 โครงสร้างทั่วๆ ไปของโช้คความถี่สูง

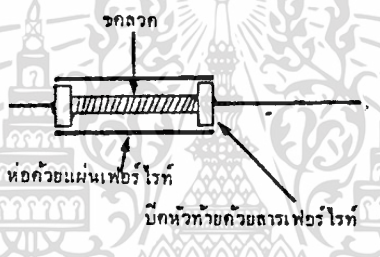
โครงสร้าง

แบบทั่ว ๆ ไป จะเห็นรูปร่างของโช้คได้ตามรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นเป็นลวดพันบนแกนอะไรสักอย่างหนึ่ง (อย่างเดียวกับที่ใช้ทำแผ่นวงจรพิมพ์แบบธรรมดา) เป็นพลาสติค หรือเป็นผงเหล็กหรือไม่ก็อาจเป็นสารเฟอร์ไรท์ก็ได้ ถ้าเป็นผงเหล็กหรือสารเฟอร์ไรท์ก็จะช่วยลดจำนวนรอบของขดลวดให้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติแล้วแกนที่ใช้พันขอลวดจะมีปลายลวดยื่นออกมาทั้ง 2 ข้าง ลวดทั้ง 2 เส้นนี้จะฝังติดกับแกนแน่น และปลายลวดนี้ก็จะเชื่อมต่อกับปลายทั้งสองของขดลวด รูปร่างโดยทั่วไปจะเห็นแกนยาวแบบทรงกระบอก แต่ที่ปลายลวดทั้งสองหรือขาของมันยื่นออกมาทางเดียวกันก็มีเหมือนกัน

โครงสร้างอีกแบบหนึ่งดังที่เห็นในรูปที่ 2 สร้างมาเพื่อลดผลของการรบกวนจากสนามแม่เหล็กภายนอกโช้คแบบนี้สามารถติดตั้งชิดกันหลาย ๆ ตัวเลยก็ได้



รูปที่ 2 โครงสร้างของโช้คความถี่สูง แบบป้องกันการรบกวน

โช้คที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ๆ มักพันเป็นแบบโซลินอยด์ (solenoid) โดยพันเพียงชั้นเดียวมักจะมีค่าความเหนี่ยวนำอยู่ในช่วง 0.1 uH ถึง 200 uH โช้คที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำมาก ๆ ประมาณ 10 uH ลงไป จะพันบนแกนที่ทำด้วยสารที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ถ้าแกนเป็นผงเหล็กจะมีค่าความเหนี่ยวนำสูงขึ้นมา อยู่ในระหว่าง 5 uH ถึง 100 uH และถ้าเป็นเฟอร์ไรท์จะมีค่าสูงขึ้นไปถึง 200 uH

โช้คที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูง ๆ หน่อยมักจะพันกันแบบหลายชั้น แต่การพันแบบหลายชั้นนั้นมีข้อจำกัด คือ ค่าความจุที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นลวดกันเอง จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ทำให้ใช้กับสัญญาณความถี่สูง ๆ ไม่ได้ โช้คที่พันขดลวดแบบหลายชั้นจะมีค่าความเหนี่ยวนำอยู่ในช่วง 20 uH ถึง 10 mH และมักจะใช้แกนเป็นผงเหล็กหรือไม่ก็เฟอร์ไรท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

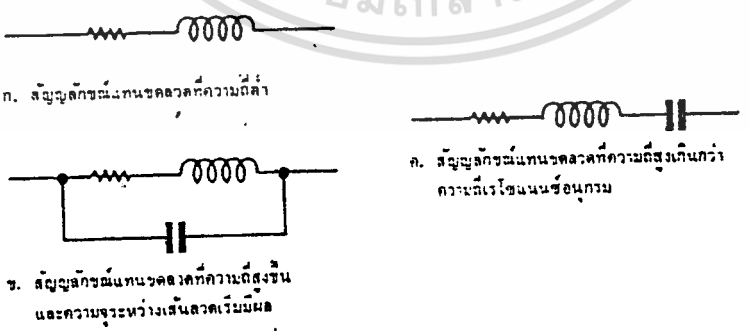
โช้คที่พันเป็นแบบพาย (piewound) มักจะมีค่าตั้งแต่ 47 uH ไปจนถึง 100 mH โช้คแบบพายจะพันลวดเป็นรูปคล้ายวงแหวน มีจำนวนชั้นมากและพันซิกแซ็กไปมาเพื่อลดค่าความจุระหว่างเส้นลวดลงไป โช้คแบบพายอาจมีลวดที่พันเป็นวงแหวนอยู่ได้ 1, 2, 3, 4, 5 หรือ 6 ชุด เพื่อเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำให้สูงขึ้น ปกติแล้วความกว้าง, เส้นผ่าศูนย์กลาง และจำนวนรอบของลวดของวงแหวน มักจะเท่ากัน แต่ก็ไม่แน่เสมอไป สำหรับโช้คที่ใช้ในงานพิเศษ อาจลดเส้นผ่าศูนย์กลางลงและเพิ่มความกว้างขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่แน่นอนกว่า

โช้คอีกแบบหนึ่ง คือ *แบบโปรเกรสสีฟ แล็ทเทอราล* (progressive lateral) คล้าย ๆ แบบพาย แต่แทนที่จะพันขดลวดซิกแซกขึ้นทางด้านสูง กลับพันซิกแซกไปรอบ ๆ แกน วิธีนี้ช่วยลดค่าความจุที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นลวด และมีค่าความเหนี่ยวนำแน่นอนกว่า

โช้คที่ถูกห่อหุ้มจนมิดทั้งตัว อาจเป็นได้ทั้งแบบที่พันลวดชั้นเดียวหรือหลายชั้น และอาจหล่อด้วยอะไรก็ได้ที่เหมาะสม เช่น อีป๊อกซี่ เป็นต้น โช้คแบบพายบางทีถูกห่อจนมิดก็มี แต่มักจะเคลือบด้วยขี้ผึ้งมากกว่า

คุณสมบัติการทำงาน

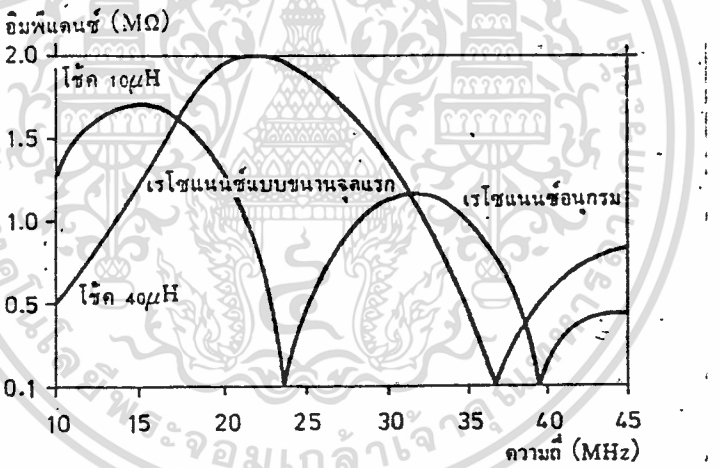
โช้คที่ดีจะต้องให้ค่าอิมพีแดนซ์สูงได้ตลอดช่วงความถี่กว้าง ๆ แต่ในความเป็นจริง การที่มีค่าความจุระหว่างเส้นลวดกระจายอยู่ทั่วไป และความต้านทานภายในเส้นลวดจะมีผลให้การทำงานเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 3 สัญญลักษณ์แทนขดลวดที่ความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

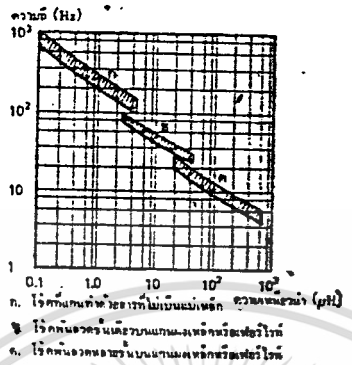
ที่ความถี่ต่ำ ๆ ค่าความจุมีผลกระทบกระเทือนน้อยมากจนถือได้ว่าค่าความจุนี้ไม่มีเลยก็ได้ ซึ่งจะแทนโช้คได้ด้วยสัญญลักษณ์ รูป ก. ในรูปที่ 3 ที่ความถี่สูงขึ้น ๆ จนถึงที่ความถี่อันหนึ่งมันจะทำหน้าที่เป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งแทนได้ด้วยสัญญลักษณ์ในรูป ข. ที่ความถี่สูงขึ้นไปกว่านี้ ค่าความจุระหว่างเส้นลวดจะมีผลมากกว่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ตัวโช้คแทนที่จะมีความเหนี่ยวนำ กลับกลายเป็นมีความจุไปดังสัญญลักษณ์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมใน . รูป ค. ค่าอิมพีแดนซ์ของโช้คนี้จะเห็นว่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามความถี่ ดังกราฟใน รูปที่ 4 ในการใช้งาน เราไม่ควรใช้งานโช้คที่ความถี่ใกล้กับค่าความถี่เรโซแนนซ์อนุกรมมากเกินไป โดยปกติจะใช้งานห่างออกไปประมาณ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และไม่ควรใช้งานโช้คที่ความถี่เกินกว่า 150 เปอร์เซนต์ ของค่าความถี่เรโซแนนซ์อนุกรมด้วย



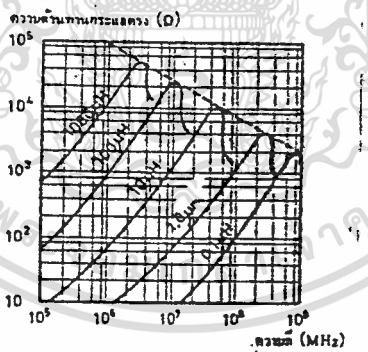
รูปที่ 4 ค่าอิมพีแดนซ์ของโช้คทั่วๆ ไปที่ความถี่ต่างๆ

ยิ่งค่าความจุระหว่างเส้นลวดน้อยเท่าไร ค่าความถี่เรโซแนนซ์อนุกรมก็จะยิ่งสูงมากเท่านั้น ซึ่งก็คือความสามารถในการทำงานของโช้คที่ความสูงขึ้นนั่นเอง โช้คแบบพิเศษ ๆ เช่น แบบโปรเกรสสีฟ แล็ทเทอราล มีค่าความจุระหว่างเส้นลวดต่ำมาก ทั้งยังมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ตลอดช่วงความถี่ ใช้งานน้อยมากเมื่อเทียบกับโช้คแบบอื่น ๆ ซึ่งได้เปรียบเทียบกันให้ดูแล้วดังในรูปที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบความถี่เรโซแนนซ์อนุกรมกับค่าความเหนี่ยวนำของโช้ครูปร่างต่างๆ



รูปที่ 6 ค่าความต้านทานกระแสตรงของโช้คที่ความถี่ต่างๆ

ความต้านทานกระแสตรงของโช้คสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งเป็นความต้านทานปกติ อีกส่วนหนึ่งเป็นความต้านทานที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากกระแสจะไม่ยอมไหลในใจกลางของเส้นลวด แต่จะมาเบียดกันไหลตามผิวของเส้นเพิ่มขึ้นทุกที เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ๆ ถ้าคิดเฉพาะความต้าน

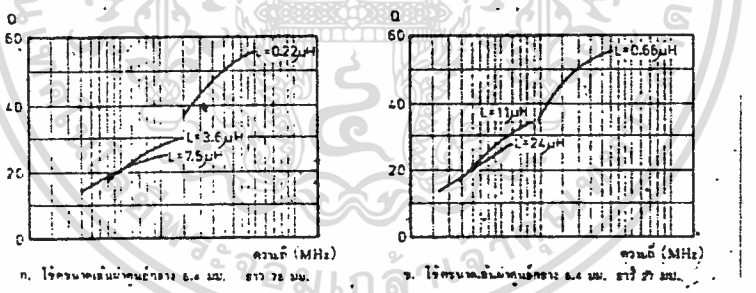
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทานปกติก็อาจได้ถึง 500 ถึง 600 โอห์ม สำหรับโช้คที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูง แต่ไม่ใช่ขึ้นตลอด เพราะผลอันเนื่องมาจากค่าความจุระหว่างเส้นลวดจะทำให้ค่าความต้านทานนี้ตกลงในที่สุด ตามเส้นกราฟในรูปที่ 6

ค่าจำกัดของโช้คความถี่สูงนี้อีกตัวหนึ่งคือ จำนวนกระแสที่ยอมให้ไหลผ่านตัวมันได้โดยไม่เกิดความร้อนจนถึงขั้นเสียหาย และไม่มากพอที่จะเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติการทำงานของมัน ซึ่งมักจะมีค่าอยู่ในช่วงไม่กี่มิลลิแอมแปร์ สำหรับโช้คที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูง ๆ จนถึงหลายแอมแปร์ สำหรับโช้คที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ๆ

โช้คที่ทำมาสำหรับทนกระแสสูงหน่อยก็มีเหมือนกัน มักจะใช้กับพวกวงจรกันสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเอสซีอาร์หรือไตรแอค วงจรกันกระแสกระชากของไส้หลอดต่าง ๆ และวงจรส่งกำลังความถี่วิทยุกำลังสูง ๆ แบบหลอด เป็นต้น

ค่า Q ของโช้คมักจะต่ำ เพราะไม่ได้ต้องการให้ทำงานที่ความถี่เดียวเหมือนวงจรเลือกความถี่ ค่าที่ได้จากที่ผู้ผลิตกำหนดมามักจะเป็นค่า Q ต่ำสุดที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง ลองดูตัวอย่างในรูปที่ 7



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่า Q ของโช้คกับความถี่ของโช้ค 2 ขนาด

การอ่านค่า

การเขียนค่าความเหนี่ยวนำของโช้คนั้นเขียนได้หลายวิธี วิธีการใช้รหัสสีได้อธิบายย่อ ๆ ไว้แล้วในรูปที่ 8, 9, 10 และ 11 หน่วยของค่าความเหนี่ยวนำตามปกติใช้เป็นไมโครเฮนรี่ (uH) เสมอ การบอกว่าเป็นรหัสตัวเลขก็เป็นแบบง่าย ๆ เช่น โช้คที่มีค่าความเหนี่ยวนำไม่เกินกว่า 100 uH จะใช้ตัวเลขเพียง 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเท่านั้น แล้วใช้ตัว R แทนจุดทศนิยม ดังตัวอย่าง

0.68 uH เขียนเป็น R680

4.7 uH เขียนเป็น 4R70

33 uH เขียนเป็น 33R0

สำหรับโช้คที่มีค่าความเหนี่ยวนำตั้งแต่ 100 uH ขึ้นไป จะเขียนด้วยตัวเลข 4 ตัวเท่านั้น 3 ตัวแรกบอกค่าตัวเลขข้างหน้า และตัวสุดท้ายบอกจำนวนเลขศูนย์ที่ต่อท้าย ดังตัวอย่าง

680 uH เขียนเป็น 6800

4700 uH เขียนเป็น 4701

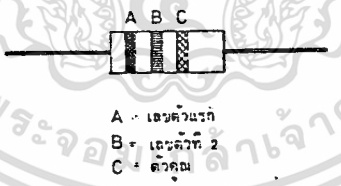
33000 uH เขียนเป็น 3302

ยังมีตัวอักษรที่ต่อท้ายอีกตัวหนึ่ง ซึ่งจะบอกค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของค่าความเหนี่ยวนำดังต่อไปนี้

J = 5%

K = 10%

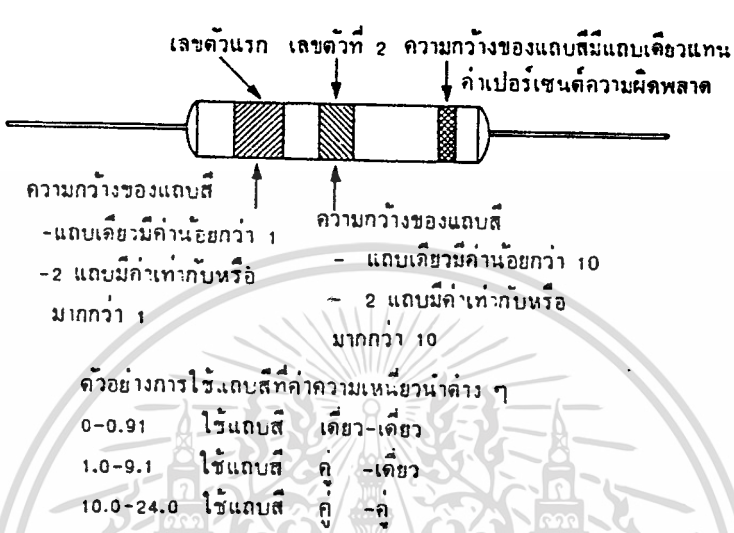
M = 20%



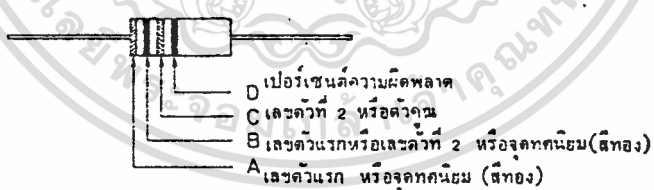
สี	A,B	C
เงิน		10^{-2}
ทอง		10^{-1}
ดำ	0	1_1
น้ำตาล	1	10^1
แดง	2	10^2
ส้ม	3	10^3
เหลือง	4	10^4
เขียว	5	10^5
น้ำเงิน	6	10^6
ม่วง	7	10^7
เทา	8	10^8
ขาว	9	10^9

รูปที่ 8 รหัสสีของโช้คที่ใช้แบบเดียวกับตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



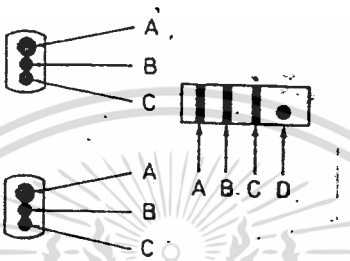
รูปที่ 9 รหัสสีแบบใช้ความกว้างของแถบสีบอกตำแหน่งของจุดทศนิยม



0.33μH,±10%	4.7μH, ±5%	15mH, ±5%
A = ทอง B = ส้ม C = ส้ม D = เงิน	A = เหลือง B = ทอง C = ม่วง D = ทอง	A = น้ำตาล B = เขียว C = ส้ม D = ทอง

รูปที่ 10 การอ่านค่าแบบนี้คล้ายในรูปที่ 8 แต่ใช้สีทองแทนจุดทศนิยม ถ้าค่าความเหนี่ยวนำน้อยกว่า 10 uH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 โช้คขนาดเล็กที่ใช้ติดตั้งบนแผ่นวงจรพิมพ์บางทีอาจใช้จุดสีแทนแถบสีก็ได้แต่การอ่านค่ายังคงเหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพันคอยล์ให้ได้ค่า L ตามต้องการ

ลวดตัวนำที่พันหรือขดขึ้นเป็นคอยล์ มักจะใช้ในวงจรที่มีความถี่ไฟสลับ ทำหน้าที่เป็นตัวที่ทำให้เกิดอินดัคแตนซ์ในวงจร เราเรียกอุปกรณ์พวกนี้ว่า อินดัคเตอร์ (INDUCTOR) หรือบางทีเรียกว่า โช้ค(CHOKE) หรือคอยล์ก็ได้ แกนของอินดัคเตอร์มีทั้งที่ทำจากสารแม่เหล็ก เช่น แกนเหล็ก หรือแกนเฟอร์ไรท์ หรืออาจจะใช้แกนที่เป็นฉนวนไม่มีคุณสมบัติของสารแกนเหล็ก เช่น พลาสติก หรือเบเคไลท์ (BAKELITE) สำหรับเป็นโครงยึดขดลวดในกรณีที่พันด้วยเส้นลวดเล็ก ๆ หรือถ้าเป็นลวดเส้นโต ๆ ก็พันตัวเปล่า ๆ โดยไม่ต้องมีแกน ซึ่งเราเรียกอินดัคเตอร์ที่ไม่ได้ใช้สารแม่เหล็กเป็นแกนเหล่านี้ว่า อินดัคเตอร์แกนอากาศ (AIR CORE INDUCTOR)

อินดัคเตอร์มีค่าคงที่อยู่ค่าหนึ่งซึ่งเราเรียกกันว่า อินดัคแตนซ์ (INDUCTANCE) เราแทนค่านี้ด้วยอักษร L ค่าอินดัคแตนซ์เป็นค่าที่เกิดจากการยุบตัวและพองตัวของสนามแม่เหล็กในอินดัคเตอร์ที่ต่อในวงจรไฟฟ้าสลับ ทำให้มีคุณสมบัติของวงจรไฟฟ้าที่พยายามจะต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลในวงจร

ค่าของอินดัคแตนซ์ขึ้นกับชนิดและขนาดของแกน รวมทั้งลักษณะการพันคอยล์และจำนวนขดลวดของคอยล์ คอยล์ที่ใช้แกนเป็นฉนวนหรืออากาศมากและคอยล์ที่มีจำนวนขดลวดมากจะทำให้มีค่าอินดัคแตนซ์มากขึ้นตามไปด้วย

หน่วยพื้นฐานของค่าอินดัคแตนซ์ก็คือ เฮนรี่ (Henry) เราให้คำจำกัดความของหน่วยเฮนรี่ดังนี้ ตัวนำหรือคอยล์ จะมีค่าอินดัคแตนซ์ 1 เฮนรี่ ก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสในอัตรา 1 แอมแปร์ต่อ 1 วินาที แล้วทำให้เกิดแรงดันต้านกลับ (V_{emf}) 1 โวลท์

หน่วยย่อยของเฮนรี่ ได้แก่ มิลลิเฮนรี่ (milli henry) และไมโครเฮนรี่ (micro henry) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\text{มิลลิเฮนรี่ (mH)} = \frac{1}{1,000} \text{ H}$$

$$\text{หรือ } 1 \text{ H} = 1,000 \text{ mH}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเฮนรี่ (H) = $\frac{1}{1,000,000}$ H

หรือ 1 H = 1,000,000 uH

อินดัคเตอร์ที่ใช้ในวงจรอิเลคทรอนิคส์ มีค่าอินดัคแตนซ์ในช่วงกว้างมาก เช่น ถ้าอยู่ในวงจรจ่ายไฟก็ใช้ค่าหลายเฮนรี่ ซึ่งจะต้องใช้ขดลวดพันบนแกนเหล็กจึงจะได้ค่ามาก ๆ ถ้าอยู่ในวงจรที่ความถี่ไม่สูงนัก ค่าอินดัคแตนซ์ที่ใช้จะอยู่ในช่วงมิลลิ-เฮนรี่ (mH) ถ้าในวงจรความถี่ปานกลาง และที่ความถี่สูงขึ้นไป ค่าอินดัคแตนซ์ที่ใช้จะอยู่ในช่วงไมโครเฮนรี่ (uH)

ในตัวนำย่อมมีค่าอินดัคแตนซ์เสมอ แม้ว่าตัวนำนั้นไม่อยู่ในรูปของคอยล์ก็ตาม ลวดตัวนำที่เป็นเส้นตรงสั้นๆ จะมีค่าอินดัคแตนซ์น้อยมาก แต่ถ้าหากมีกระแสที่เปลี่ยนแปลงไหลผ่านตัวมันมากพอก็จะทำให้เกิดการเหนียวนำขึ้นได้ หรือลวดตัวนำที่ยาวเพียงไม่กี่นิ้ว เราอาจจะมองข้ามไปได้ ถ้าอยู่ในวงจรความถี่ต่ำ ๆ แต่ในกรณีที่ความถี่สูงกว่า 100 MHz ขึ้นไป เส้นลวดอันนี้จะมีผลต่อความถี่ในวงจรได้

ค่าอินดัคแตนซ์โดยประมาณของขดลวดที่พันชั้นเดียวบนแกนอากาศ คำนวณได้จากสูตร

* หาค่าอินดัคแตนซ์ $L = \frac{a^2n^2}{9a+10b}$

หรือหาจำนวนรอบของขดลวดได้โดยการจัดสูตรใหม่

* หาจำนวนรอบ $n = \sqrt{\frac{L(9a+10b)}{a^2}}$

L คือ ค่าดินดัคแตนซ์ มีหน่วยเป็น uH

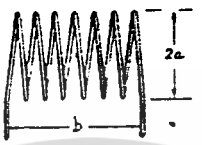
a คือ รัศมีของคอย์ มีหน่วยเป็นนิ้ว

b คือ ความยาวในการพันขดลวดมีหน่วยเป็นนิ้ว

n คือ จำนวนรอบของขดลวด

ค่าที่ได้จากการคำนวณของสูตรนี้จะใกล้เคียงความจริง ถ้าความยาวของการพันขดลวด (ค่า b) มีไม่น้อยกว่า 0.8 a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงความหมายของ a และ b ของขดลวด

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณหาค่า L สมมติมีคอยล์ขดหนึ่ง พันไว้ 48 รอบ ด้วยระยะการพัน 32 รอบต่อนิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลางของคอยล์ = $^{3}/_{4}$ นิ้ว ให้หาค่า L ของขดลวดขดนี้

ระยะพันคอยล์ 21 รอบ
ได้คอยล์ = 1 นิ้ว

ถ้าคอยล์พัน 48 รอบ จะได้ความยาว (ค่า b) = $\frac{48}{32}$ = 1.5 นิ้ว

เส้นผ่าศูนย์กลางของคอยล์ = 3/4 นิ้ว = 0.75 นิ้ว

รัศมีของคอยล์ (ค่า b) = 0.75 + 2 = 0.375 นิ้ว

แทนค่าในสูตร

$$L = \frac{0.375*0.375*48*48}{(9*0.375)+(10*1.5)}$$

$$= 17.6 \quad H$$

ตัวอย่างที่ 2 การคำนวณหาจำนวนรอบของคอยล์ สมมติต้องการพันคอยล์ให้ได้ค่าอินดัคแตนซ์ = 10 H โดยที่คอยล์มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว และมีความยาวของคอยล์เท่ากับ 1 $^{1}/_{4}$ นิ้ว ดังนั้น a = 0.5 b = 1.25 และ L = 10 แทนค่าในสูตรดังนี้หาจำนวนรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = L\sqrt{\frac{9a+10b}{a^2}}$$

$$= 10\sqrt{\frac{(4.5+12.5)}{0.5*0.5}}$$

$$= \sqrt{680}$$

$$= 26.1 \text{ รอบ}$$

ในทางปฏิบัติเราพันแค่ 26 รอบ ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ เนื่องจากความยาวของคอยล์ที่ต้องการ = 1.25 นิ้ว เราจึงหาค่าจำนวนรอบต่อนิ้วได้ = $\frac{26.1}{1.25}$ = 20.9 รอบต่อนิ้ว

เรานำค่าจำนวนรอบต่อนิ้วที่ได้ ไปเทียบดูในตารางที่ 1 เพื่อหาค่าเบอร์ลวดที่จะนำมาพันคอยล์ จะเห็นว่าลวดเบอร์ AWG 17 หรือ SWG 18 ในตารางที่ 1 สามารถใช้ได้เพราะพันได้ถึง 21.2 รอบต่อนิ้ว (มากกว่าที่คำนวณได้เล็กน้อย) เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับการคำนวณ หรือจะใช้ลวดเบอร์อื่นที่เล็กกว่าก็ได้ (ลวดเบอร์สูงขึ้น)

ในการพัน ให้พันจนได้จำนวนรอบ 26 รอบ ตามที่ต้องการ แล้วจึงปรับระยะห่างระหว่างรอบให้เท่า ๆ กัน จนได้ความยาวรวมของคอยล์เท่ากับ 1.25 นิ้ว

สูตรสำหรับหาค่าอินดัคแตนซ์ และจำนวนรอบอีกแบบ ซึ่งเหมือนกับสูตรก่อนแต่อยู่ในรูปแบบที่ต่างกันเท่านั้น คือ

* หาค่าอินดัคแตนซ์ $L(uH) = \frac{d^2n^2}{18d+401}$

* หาจำนวนรอบ $n = \frac{\sqrt{L(18d+401)}}{d}$

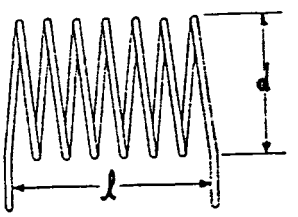
กำหนดให้

L = ค่าอินดัคเตอร์ หน่วยเป็นไมโครเฮนรี่

d = เส้นผ่าศูนย์กลางคอยล์ หน่วยเป็นนิ้ว

l = ความยาวของคอยล์ หน่วยเป็นนิ้ว

n = จำนวนรอบของคอยล์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้โจทย์ตามตัวอย่างที่ 1 ในการหาค่าอินดัคแตนซ์ ดังนั้น d = 0.75, l = 48/32 = 1.5 และ n = 48

แทนค่าในสูตร

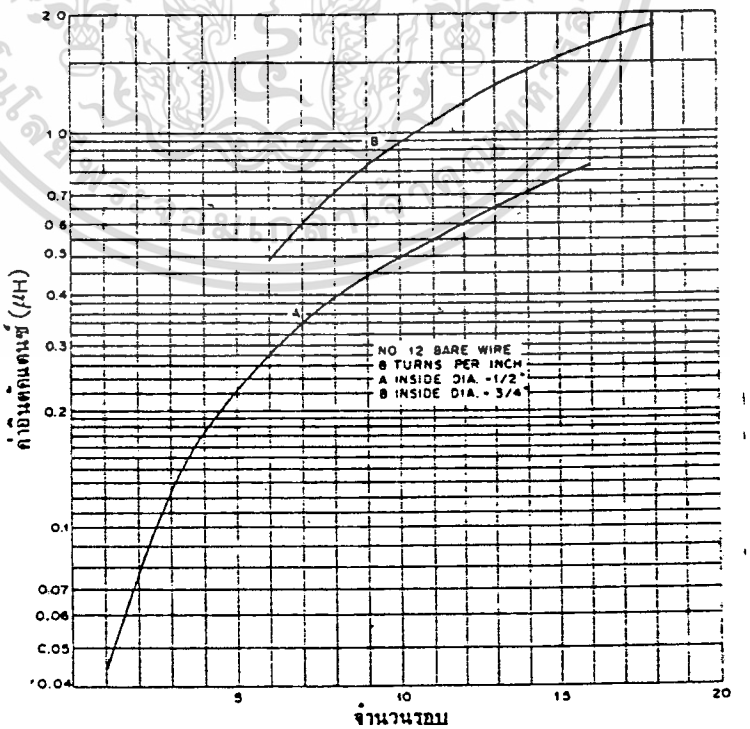
$$L = \frac{0.75^2 * 48^2}{18*(0.75+40)*1.5} = \frac{1296}{73.5} = 17.6 \text{ uH}$$

ใช้โจทย์ตามตัวอย่างที่ 2 ในการหาจำนวนรอบ ดังนี้ d = 1 , l = 1.25 และ L = 10

แทนค่าในสูตร

$$n = \frac{\sqrt{10(18*(1+40)*1.25)}}{1} = \sqrt{680} = 26.1 \text{ รอบ}$$

โดยมากแล้วค่าที่หาได้จากสูตรอินดัคแตนซ์จะไม่ค่อยตรงนัก ถ้านำไปใช้กับคอยล์อันเล็ก ๆ เช่น ที่ใช้ในย่านความถี่ VHF หรือที่ใช้เป็นตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ (LOWPASS filters) เพื่อกันไม่ให้คลื่นฮาร์โมนิคออกไปรบกวนโทรทัศน์ เพราะความหนาของลวดตัวนำไม่มากพอ จนต้องตัดทิ้งไปเมื่อนำมาเทียบกับขนาดของคอยล์ ในรูปที่ 1 แสดงค่าที่วัดได้จากคอยล์ที่ใช้งานในย่านความถี่ VHF ซึ่งอาจนำมาหาค่าต่าง ๆ ของคอยล์ได้



รูปที่ 1 แสดงผลการวัดค่าอินดัคแตนซ์ของขดลวดเมื่อใช้ลวดเบอร์ 12AWG พันด้วย 8 รอบต่อนิ้ว โดยเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของเส้น A = $\frac{1}{2}$" และของเส้น B= $\frac{3}{4}$"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 1 มีเส้น 2 เส้น เส้น A สำหรับคอยล์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 1/2 นิ้ว เส้น B สำหรับคอยล์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 3/4 นิ้ว คอยล์ทั้ง 2 แบบ พันด้วยลวดเบอร์ 12 AWG ระยะความยาวของการพันคอยล์ 8 รอบต่อนิ้ว (ระยะจากกึ่งกลางของเส้นลวดเส้นหนึ่งไปยังกึ่งกลางของเส้นลวดถัดไป = 1/8 นิ้ว) ค่าของอินดัคแตนซ์ที่ได้รวมทั้งค่าอินดัคแตนซ์ที่เกิดจากปลายลวดที่ยาว 1/2 นิ้ว ด้วย

ตามรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ใช้สำหรับหาค่าอินดัคแตนซ์ของคอยล์ ที่ใช้กันทั่วไปในวงจรความถี่วิทยุย่าน 3-30 MHz ค่าที่ได้จะถูกต้องเพียงพอต่อการใช้งานจริง

ในกราฟของรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ใช้หาค่า ตัวประกอบการคูณ (Multiplying factor) โดยแกนทางแนวนอนของกราฟแสดงค่าความยาวของคอยล์ แกนทางแนวตั้งแสดงค่าตัวประกอบการคูณ

เราหาค่าตัวประกอบการคูณของคอยล์ ได้จากการลากเส้นตรงขึ้นไปจากจุดบนแกนทางแนวนอน ตามค่าความยาวของคอยล์ที่เราต้องการหาค่าอินดัคแตนซ์ ณ จุดที่ตัดกับเส้นเคอฟว์ (CURVE) ในกราฟ ให้ลากเส้นตรงไปตัดกับแกนทางแนวตั้ง จุดนี้เป็นจุดที่แสดงค่าตัวประกอบการคูณที่ต้องการ เราจะเอาค่านี้ไปใช้ในการหาค่าอินดัคแตนซ์ของคอยล์ในขั้นต่อไป

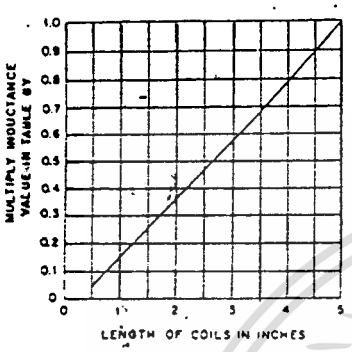
ส่วนตารางของล่างกราฟนั้น แสดงค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง, จำนวนรอบต่อนิ้ว และค่าอินดัคแตนซ์ของคอยล์ที่มีความยาว 1 นิ้ว เราหาค่าอินดัคแตนซ์ของคอยล์ที่ต้องการทราบค่าได้โดยเทียบค่าในตารางตรงช่องที่มีค่าเส้นผ่าศูนย์กลางคอยล์และจำนวนรอบต่อนิ้วตรงกับคอยล์ของเรา เราเอาค่าอินดัคแตนซ์ของคอยล์นี้ที่ความยาว 1 นิ้ว จากช่องขวาสุดในตาราง มาคูณกับค่าตัวประกอบการคูณที่ได้จากขั้นก่อนผลลัพธ์ที่ได้เป็นค่าอินดัคแตนซ์ของคอยล์ที่เราต้องการทราบค่า

ตัวอย่าง ในการหาค่าอินดัคแตนซ์ของคอยล์ที่มีจำนวนรอบ = 20 รอบ เส้นผ่าศูนย์กลางคอยล์ = 1 นิ้ว คอยล์ยาว = $1\ ^1/_4$ นิ้ว

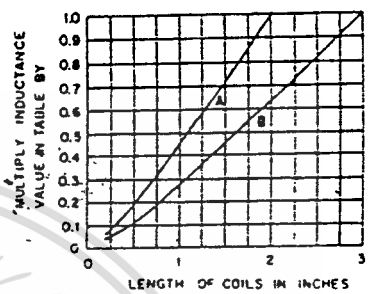
คอยล์ยาว $1\ ^1/_4$ นิ้ว = $^5/_4$ นิ้ว
คอยล์มีจำนวนรอบ = 20 รอบ
จำนวนรอบต่อนิ้ว = 16 รอบต่อนิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าเส้นผ่าศูนย์กลางคอยล์ และจำนวนรอบต่อนิ้ว ไปเทียบค่าในตาราง



รูปที่ 2



รูปที่ 3 เส้น A สำหรับคอยล์ที่มี (A)
เส้น B สำหรับคอยล์ที่มี (B)

ϕ คอยล์เป็นนิ้ว รอบต่อนิ้ว ค่า L ของคอยล์ยาว 1 นิ้ว

Coil Dia Inches	*Turns Per Inch*	*Inductance In μH*
1¼	4	2.75
	6	6.3
	8	11.2
	10	17.5
	16	42.5
1½	4	3.9
	6	8.8
	8	15.6
	10	24.5
	16	63
1¾	4	5.2
	6	11.8
	8	21
	10	33
	16	85
2	4	6.6
	6	15
	8	26.5
	10	42
	16	108
2½	4	10.2
	6	23
	8	41
	10	64
3	4	14
	6	31.5
	8	56
	10	89

ϕ คอยล์เป็นนิ้ว รอบต่อนิ้ว ค่า L ของคอยล์ยาว 1 นิ้ว

Coil Dia Inches	*Turns Per Inch*	*Inductance In μH*
½ (A)	4	0.18
	6	0.40
	8	0.72
	10	1.12
	16	2.9
	32	12
5/8 (A)	4	0.28
	6	0.62
	8	1.1
	10	1.7
	16	4.4
	32	18
¾ (B)	4	0.6
	6	1.35
	8	2.4
	10	3.8
	16	9.9
	32	40
1 (B)	4	1.0
	6	2.3
	8	4.2
	10	6.6
	16	16.9
	32	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ค่าอินดัคแตนซ์ของคอยล์นี้ที่ความยาว 1 นิ้ว = 1.69 uH

เอาค่าความยาวคอยล์ 1 $^1/_4$ นิ้ว ไปหาค่าตัวประกอบการคูณจากกราฟได้ค่า = 0.35

คอยล์ที่ต้องการทราบค่ามีอินดัคแตนซ์ = 16.9*3.5 = 5.9 uH

การหาค่า L สำหรับการพันทบหลายชั้น

กรณีที่ต้องการพันหลายชั้น จะคำนวณหาค่า L ได้ดังนี้

$$L = \frac{0.8a^2n^2}{6a+9b+10c}$$

โดยที่ L คือ ค่าอินดัคแตนซ์ของขดลวด มีหน่วยเป็น μH

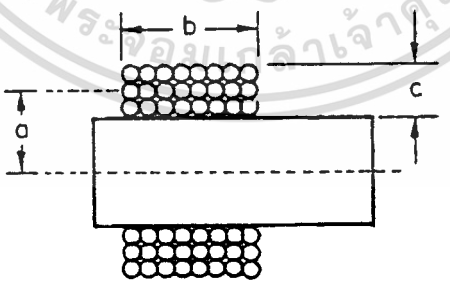
a คือ รัศมีเฉลี่ยของการพัน มีหน่วยเป็นนิ้ว (เท่ากับรัศมีของแกน + $^1/_2$ c)

b คือ ความยาวของการพันขดลวด มีหน่วยเป็นนิ้ว

c คือ ความหนาของชั้นลวดที่ทบกันขึ้นไป

n คือ จำนวนรอบของขดลวด

ลองดูรูปที่ 4 จะเข้าใจความหมายของอักษรย่อต่าง ๆ ได้ดีขึ้น



รูปที่ 4 แสดงความหมายของอักษรย่อต่างๆ สำหรับการพันหลายชั้นในรูปเป็นภาพหน้าตัดของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าต้องการให้ได้ค่า L สูงสุด สำหรับความยาวของลวดที่มีจำกัดแล้ว ควรเลือกให้ b = c = 0.8a

หลังจากที่กำหนดขนาดของ a, b, c และค่า L ที่ต้องการแล้ว ก็จะสามารถคำนวณหาจำนวนรอบที่ต้องพันได้โดยจัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{L(6a+9b+10c)}{0.8a^2}}$$

ขนาดของลวดที่จะใช้พันขึ้นอยู่กับค่า b, c และระยะห่างระหว่างแต่ละรอบสำหรับการพันทบหลายชั้นนี้ หลังจากคำนวณจำนวนรอบที่ต้องพันได้แล้วนำมาหารด้วยผลคูณของความยาวของการพัน (b) และความลึก (c) ก็จะได้จำนวนรอบต่อตารางนิ้ว ซึ่งจะนำไปเปรียบเทียบกับช่องที่ 5 ในตารางที่ 1 เพื่อนำไปพิจารณาเลือกขนาดขดลวด

ตัวอย่างที่ 3 มีแกนยาวพอที่จะพันได้ยาว 0.4 นิ้ว และมีรัศมีของแกน 0.5 นิ้ว ต้องการพันขดลวดให้ได้ค่า L เป็น 22 uH

จากความต้องการนี้แสดงว่า b = 0.4 นิ้ว, L = 22 uH เริ่มต้นเราไม่รู้ว่าจะเลือกค่า a และ c เป็นเท่าไรดี ก็สมมติให้ b = c = 0.8a ซึ่งเป็นการพันที่ใช้ความยาวของเส้นลวดน้อยที่สุด

a = b = 0.4 = 0.5 นิ้ว

และ c = b = 0.4 นิ้ว

$$n = \sqrt{\frac{22(3+3.6+4)}{0.8*0.5*0.5}} = 34.2 \text{ รอบ}$$

จำนวนรอบต่อตารางนิ้ว $\frac{n}{bc} = \frac{34.2}{0.4*0.4} = 213.8$

เมื่อดูจากตารางที่ 1 ในช่องที่ 5 จะเห็นว่าลวดเบอร์ 14 AWG หรือเบอร์ 16 SWG ใช้ได้เพราะสามารถพันได้ประมาณ 221 รอบต่อตารางนิ้ว ซึ่งเป็นค่าสูงที่ใกล้เคียงกับ 213.8 มากที่สุด เมื่อดูช่องที่ 4 จะเห็นว่าเบอร์ 14 AWG สามารถพันได้ประมาณ 13.6 รอบต่อความยาว 1 นิ้ว แต่ความยาวของการพันคือ b = 0.4 นิ้ว ดังนั้นในแต่ละ 1 ชั้น จะต้องพันให้ได้ 13.6*0.4 = 5.4 รอบ และจะต้องพัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างนี้ประมาณ 34.2 / 5.4 = 6.3 ชั้น

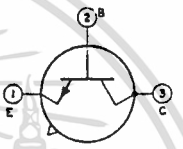
สรุปแล้วก็คือต้องพันชั้นละ 5.4 รอบ แล้วทบขึ้นไปจนรวมการพันได้ประมาณ 34.2 รอบ หรือประมาณ 6.6 ชั้น นั่นเอง

ตารางแสดงคุณสมบัติของลวดเคลือบน้ำยาเบอร์ต่าง ๆ

เบอร์ลวด AWG	เบอร์ลวด SWG ที่ใกล้เคียง	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	จำนวนรอบ/นิ้ว	จำนวนรอบ ต่อ ต.ร นิ้ว	ค่า Ω/1000 ฟุต ที่ 25 °ซ
1	1	7.348	-	-	0.1264
2	3	6.544	-	-	0.1593
3	4	5.827	-	-	0.2009
4	5	5.189	-	-	0.2533
5	7	4.621	-	-	0.3195
6	8	4.115	-	-	0.4028
7	9	3.665	-	-	0.5080
8	10	3.264	7.6	57	0.6405
9	11	2.906	8.6	72	0.8077
10	12	2.588	9.6	90	1.018
11	13	2.305	10.7	113	1.284
12	14	2.053	12.0	141	1.619
13	15	1.828	13.5	177	2.042
14	16	1.628	15.0	221	2.575
15	17	1.450	16.8	277	3.247
16	18	1.291	18.9	348	4.094
17	18	1.150	21.2	437	5.163
18	19	1.024	23.6	548	6.510
19	20	0.912	26.4	681	8.210
20	21	0.812	29.4	852	10.35
21	22	0.723	33.1	1065	13.05
22	23	0.644	37.0	1340	16.46
23	24	0.573	41.3	1665	20.76
24	25	0.511	46.3	2100	26.17
25	26	0.455	51.7	2630	33.00
26	27	0.405	58.0	3320	41.62
27	29	0.361	64.9	4145	52.48
28	30	0.321	72.7	5250	66.17
29	31	0.286	81.6	6510	83.44
30	33	0.255	90.5	8175	105.2
31	34	0.227	101	10,200	132.7
32	36	0.202	113	12,650	167.3
33	37	0.180	127	16,200	211.0
34	38	0.160	143	19,950	266.0
35	38-39	0.143	158	25,000	335
36	39-40	0.127	175	31,700	423
37	41	0.113	198	39,600	533
38	42	0.101	224	49,100	673
39	43	0.090	248	62,600	848
40	44	0.080	282	77,600	1070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2N3553 RF POWER TRANSISTOR



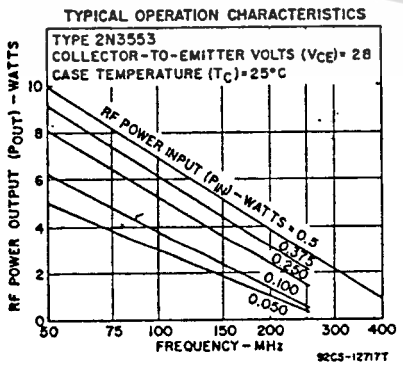
Si n-p-n "overlay" epitaxial planar type used in class A, B, and C amplifiers, frequency multipliers, or oscillators in vhf-uhf applications. JEDEC TO-39, Outline No.15.

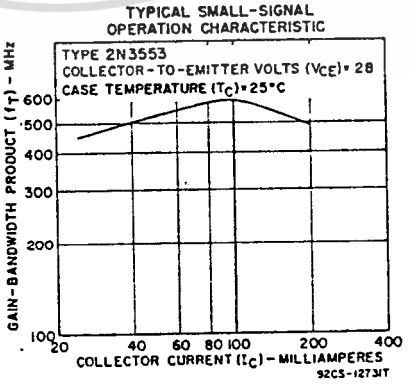
MAXIMUM RATINGS

Collector-to-Base Voltage	V_{CBO}	65	V
Collector-to-Emitter Voltage:			
V_{BE} = −1.5 V	V_{CEV}	65	V
Base open	V_{CEO}	40	V
Emitter-to-Base Voltage	V_{EBO}	4	V
Collector Current	I_C	0.33	A
Peak Collector Current	i_C	1	A
Transistor Dissipation:			
T_C up to 25°C	P_T	7	W
T_C above 25°C	P_T	Derate linearly to 0 watts at 200	°C
Temperature Range:			
Operating (Junction)	T_J (opr)	−65 to 200	°C
Storage	T_{STG}	−65 to 200	°C
Lead-Soldering Temperature (10 s max)	T_L	230	°C

CHARACTERISTICS (At case temperature = 25°C)

Collector-to-Base Breakdown Voltage (I_C = 0.3 mA, I_E = 0)	$V_{(BR)CBO}$	65 min	V
Collector-to-Emitter Breakdown Voltage:			
I_C = 0 to 0.2 A, I_B = 0, pulsed through an inductor L = 25 mH, df = 50%	$V_{(BR)CEO}$	40 min	V
I_C = 0 to 0.2 A, V_{BE} = −1.5 V, pulsed through an inductor L = 25 mH, df = 50%	$V_{(BR)CEV}$	65 min	V
Emitter-to-Base Breakdown Voltage (I_E = 0.1 mA, I_C = 0)	$V_{(BR)EBO}$	4 min	V
Collector-to-Emitter Saturation Voltage (I_C = 250 mA, I_B = 50 mA)	$V_{CE(sat)}$	1 max	V





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

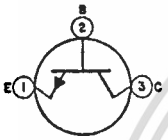
RF Power Transistors

CHARACTERISTICS (cont'd)

Collector-Cutoff Current (V_{CE} = 30 V, I_B = 0)	I_{CEO}	0.1 max	mA
Intrinsic Base-Spreading Resistance (V_{CE} = 28 V, I_C = 100 mA, f = 100 MHz)	$r_{bb'}$	12	Ω
Gain-Bandwidth Product (V_{CE} = 28 V, I_C = 100 mA)	f_T	500	MHz
Output Capacitance (V_{CB} = 30 V, I_E = 0, f = 1 MHz)	C_{obe}	10 max	pF
RF Power Output: Unneutralized Amplifier—V_{CC} = 28 V, P_{IE} = 0.25 W, R_G and R_L = 50 Ω, f = 175 MHz	P_{OE}	2.5* min	W

▲ Measured at a current where the breakdown voltage is a minimum.
* For conditions given, minimum efficiency = 50 per cent.

RF POWER TRANSISTOR 2N3632



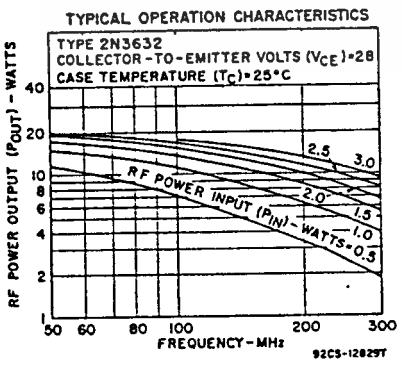
Si n-p-n "overlay" epitaxial planar type used in class A, B, and C amplifiers, frequency multipliers, or oscillators in vhf applications. JEDEC TO-60, Outline No.23. See Mounting Hardware for desired mounting arrangement.

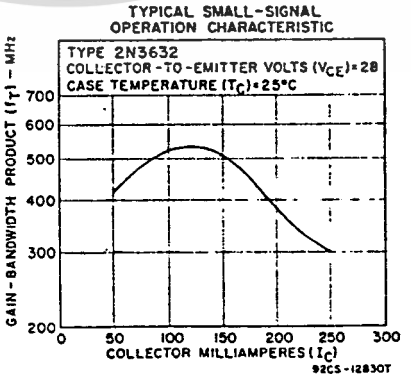
MAXIMUM RATINGS

Collector-to-Base Voltage	V_{CBO}	65	V
Collector-to-Emitter Voltage:			
V_{BE} = −1.5 V	V_{CEV}	65	V
Base open	V_{CEO}	40	V
Emitter-to-Base Voltage	V_{EBO}	4	V
Collector Current	I_C	3	A
Peak Collector Current	I_C	1	A
Transistor Dissipation:			
T_C up to 25°C	P_T	23	W
T_C above 25°C	P_T	Derate linearly to 0 watts at 200	°C
Temperature Range:			
Operating (Junction)	T_J (opr)	−65 to 200	°C
Storage	T_{STG}	−65 to 200	°C
Lead-Soldering Temperature (10 s max)	T_L	230	°C

CHARACTERISTICS (At case temperature = 25°C)

Collector-to-Base Breakdown Voltage (I_C = 0.5 mA, I_E = 0)	$V_{(BR)EBO}$	65 min	V
Collector-to-Emitter Breakdown Voltage:			
I_C = 0 to 0.2 A, I_B = 0, pulsed through an inductor L = 25 mH, df = 50%	$V_{(BR)CEO}$	40▲ min	V
I_C = 0 to 0.2 A, V_{BE} = −1.5 V, pulsed through an inductor L = 25 mH, df = 50%	$V_{(BR)CEV}$	65 min	V
Emitter-to-Base Breakdown Voltage (I_E = 0.25 mA, I_C = 0)	$V_{(BR)EBO}$	4 min	V
Collector-to-Emitter Saturation Voltage (I_C = 0.5 A, I_B = 0.1 A)	V_{CE}(sat)	1 max	V
Collector-Cutoff Current (V_{CE} = 30 V, I_B = 0)	I_{CEO}	0.25 max	mA
Gain-Bandwidth Product (V_{CE} = 28 V, I_C = 150 mA)	f_T	400	MHz





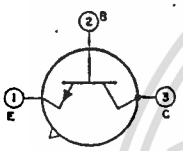
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RF Power Transistors

CHARACTERISTICS (cont'd)

Collector-to-Emitter Saturation Voltage (I_C = 0.5 A, I_B = 100 mA)	$V_{CE}(sat)$	1 max	V
Collector-Cutoff Current (V_{CE} = 30 V, I_B = 0)	I_{CEO}	0.25 max	mA
Intrinsic Base-Spreading Resistance (V_{CE} = 28 V, I_C = 250 mA, f = 200 MHz)	$r_{bb'}$	6.5	Ω
Gain-Bandwidth Product (V_{CE} = 28 V, I_C = 150 mA)	f_T	400	MHz
Collector-to-Case Capacitance	C_c	6 max	pF
Output Capacitance (V_{CB} = 30 V, I_E = 0, f = 1 MHz)	C_{obo}	20 max	pF
RF Power Output Amplifier, Unneutralized:			
V_{CE} = 28 V, P_{IE} = 4 W, R_G and R_L = 50 Ω, f = 260 MHz)	P_{OE}	14.5*	W
V_{CE} = 28 V, P_{IE} = 4 W, R_G and R_L = 50 Ω, f = 400 MHz)	P_{OE}	10† min	W

* For conditions given, minimum efficiency = 60 per cent.
† For conditions given, minimum efficiency = 45 per cent.



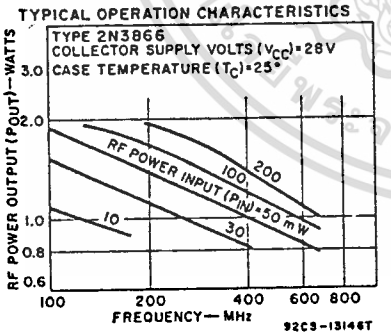
RF POWER TRANSISTOR 2N3866

Si n-p-n "overlay" epitaxial planar type for vhf-uhf applications in class A, B, and C amplifiers, frequency multipliers, and oscillators in military and industrial communications equipment. JEDEC TO-39, Outline No.15.

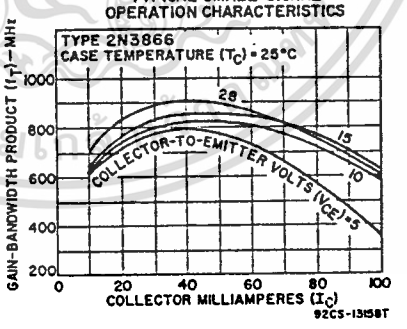
MAXIMUM RATINGS

Collector-to-Base Voltage	V_{CBO}	55	V
Collector-to-Emitter Voltage:			
R_{BE} = 10 Ω	V_{CER}	55	V
Base open	V_{CEO}	30	V
Emitter-to-Base Voltage	V_{EBO}	3.5	V
Collector Current	I_C	0.4	A
Transistor Dissipation:			
T_C up to 25°C	P_T	5	W
T_C above 25°C	P_T	See curve page 300	
Temperature Range:			
Operating (Junction)	T_J(opr)	−65 to 200	°C
Storage	T_{STG}	−65 to 200	°C
Lead-Soldering Temperature (10 s max)	T_L	230	°C

TYPICAL OPERATION CHARACTERISTICS



TYPICAL SMALL-SIGNAL OPERATION CHARACTERISTICS



CHARACTERISTICS (At case temperature = 25°C)

Collector-to-Base Breakdown Voltage (I_C = 0.1 mA, I_E = 0)	$V_{(BR)CBO}$	55 min	V
Emitter-to-Base Breakdown Voltage (I_E = 0.1 mA, I_C = 0)	$V_{(BR)EBO}$	3.5 min	V
Collector-to-Emitter Sustaining Voltage:			
I_C = 5 mA, R_{BE} = 10 Ω	V_{CER}(sus)	55 min	V
I_C = 5 mA, I_B = 0	V_{CEO}(sus)	30 min	V
Collector-to-Emitter Saturation Voltage (I_C = 100 mA, I_B = 20 mA)	V_{CE}(sat)	1 max	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

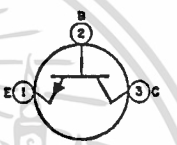
CHARACTERISTICS (cont'd)

Collector-Cutoff Current (V_{CB} = 28 V, I_E = 0)	I_{CBO}	20 max	μA
Gain-Bandwidth Product (V_{CE} = 15 V, I_C = 25 mA)	f_T	800	MHz
Output Capacitance (V_{CB} = 30 V, I_E = 0, f = 1 MHz)	C_{obo}	3 max	pF
RF Power-Output Class C Amplifier, Unneutralized:			
V_{CC} = 28 V, P_{IE} = 0.05 W, f = 100 MHz	P_{OE}	1.8*	W
V_{CC} = 28 V, P_{IE} = 0.1 W, f = 250 MHz	P_{OE}	1.5●	W
V_{CC} = 28 V, P_{IE} = 0.1 W, f = 400 MHz	P_{OE}	1† min	W

* For conditions given, minimum efficiency = 60 per cent.
● For conditions given, minimum efficiency = 50 per cent.
† For conditions given, minimum efficiency = 45 per cent.

2N4012 RF POWER TRANSISTOR

Si n-p-n "overlay" epitaxial planar type designed to provide high power as a frequency multiplier into the uhf or L-band frequency region in military and industrial communications equipment. JEDEC TO-60, Outline No.23. See Mounting Hardware for desired mounting arrangement.

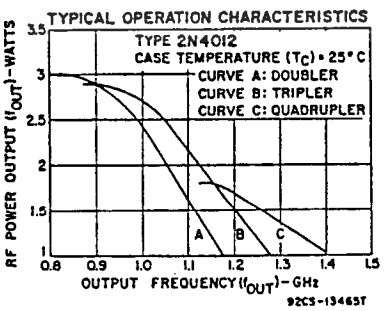


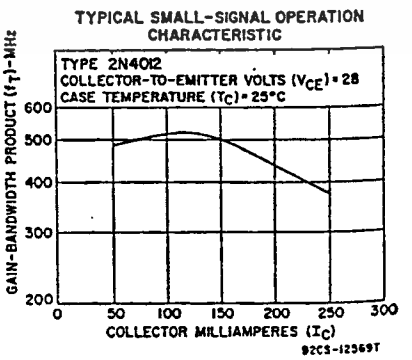
MAXIMUM RATINGS

Collector-to-Base Voltage	V_{CBO}	65	V
Collector-to-Emitter Voltage:			
V_{BE} = −1.5 V	V_{CEV}	65	V
Base open	V_{CEO}	40	V
Emitter-to-Base Voltage	V_{EBO}	4	V
Collector Current	I_C	1.5	A
Transistor Dissipation:			
Tc up to 25°C	P_T	11.6	W
Tc above 25°C	P_T	See curve page 300	
Temperature Range:			
Operating (Junction)	T_J (opr)	−65 to 200	°C
Storage	T_{STG}	−65 to 200	°C
Lead-Soldering Temperature (10 s max)	T_L	230	°C

CHARACTERISTICS

Collector-to-Base Breakdown Voltage (I_C = 0.1 mA, I_E = 0)	$V_{(BR)CBO}$	65 min	V
Collector-to-Emitter Breakdown Voltage:			
I_C = 0 to 200 mA, pulsed through an inductor L = 25 mH, df = 50%	$V_{(BR)CEO}$	40 min	V
V_{BE} = −1.5 V, I_C = 0 to 200 mA, pulsed through an inductor L = 25 mH, df = 50%	$V_{(BR)CEV}$	65 min	V
Emitter-to-Base Breakdown Voltage (I_E = 0.1 mA, I_C = 0)	$V_{(BR)EBO}$	4 min	V
Collector-to-Emitter Saturation Voltage (I_C = 500 mA, I_B = 100 mA)	V_{CE}(sat)	1 max	V
Collector-Cutoff Current (V_{CE} = 30 V, I_B = 0)	I_{CEO}	0.1 max	mA
Gain-Bandwidth Product (V_{CE} = 28 V, I_C = 150 mA)	f_T	500	MHz





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Symbols

Although semiconductor-device symbols have not yet been standardized throughout the industry, many symbols have become fairly well established by common usage. The symbols used in this Manual are listed and defined in this section.

GENERAL SEMICONDUCTOR SYMBOLS

df	duty factor
η (eta)	efficiency
NF	noise figure
T	temperature
T_A	ambient temperature
T_C	case temperature
T_J	junction temperature
T_{MF}	mounting-flange temperature
T_S	soldering temperature
T_{STG}	storage temperature
Θ	thermal resistance
Θ_{J-A}	thermal resistance, junction-to-ambient
Θ_{J-C}	thermal resistance, junction-to-case
Θ_{J-HS}	thermal resistance, junction-to-heat sink
Θ_{J-MF}	thermal resistance, junction-to-mounting-flange
t	time
t_d	delay time
$t_d + t_r$	turn-on time
t_f	fall time
t_p	pulse time
t_r	rise time
t_s	storage time
$t_s + t_f$	turn-off time
τ (tau)	time constant
τ_S	saturation stored-charge time constant

TRANSISTOR SYMBOLS

$C_{b'c}$	collector-to-base feedback capacitance
C_c	collector-to-case capacitance
C_{cb}	collector-to-base feedback capacitance
C_{ibo}	input capacitance, open circuit (common base)
C_{ieo}	input capacitance, open circuit (common emitter)
CM	cross modulation
C_{obo}	output capacitance, open circuit (common base)
C_{oeo}	output capacitance, open circuit (common emitter)
$E_S/_b$	second-breakdown energy
f_c	cutoff frequency
f_{hfb}	small-signal forward-current transfer-ratio cutoff frequency, short-circuit (common base)
f_{hfe}	small-signal forward-current transfer-ratio cutoff frequency, short-circuit (common emitter)
f_T	gain-bandwidth product (frequency at which small-signal forward-current transfer ratio, common emitter, extrapolates to unity)
g_{mo}	small-signal transconductance (common emitter)
G_{PB}	large-signal average power gain (common base)
G_{pb}	small-signal average power gain (common base)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Symbols

G_{PB}	large-signal average power gain (common emitter)
G_{pe}	small-signal average power gain (common emitter)
h_{FB}	static forward-current transfer ratio (common base)
h_{fb}	small-signal forward-current transfer ratio, short circuit (common base)
h_{FE}	static forward-current transfer ratio (common emitter)
h_{fe}	small-signal forward-current transfer ratio, short circuit (common emitter)
h_{ib}	small-signal input impedance, short circuit (common base)
h_{IE}	static input resistance (common emitter)
h_{ie}	small-signal input impedance, short circuit (common emitter)
h_{ob}	small-signal output impedance, open circuit (common base)
h_{oe}	small-signal output impedance, open circuit (common emitter)
h_{rb}	small-signal reverse-voltage transfer ratio, open circuit (common base)
h_{re}	small-signal reverse-voltage transfer ratio, open circuit (common emitter)
I_B	base current
I_{B1}	turn-on current
I_{B2}	turn-off current
I_C	collector current
i_C	collector current, instantaneous value
I_{CB}	collector-cutoff current
I_{CBO}	collector-cutoff current, emitter open
I_{CEO}	collector-cutoff current, base open
I_{CER}	collector-cutoff current, specified resistance between base and emitter
I_{CES}	collector-cutoff current, base short-circuited to emitter
I_{CEV}	collector-cutoff current, specified voltage between base and emitter
I_{CEX}	collector-cutoff current, specified circuit between base and emitter
I_{CS}	switching current (at minimum h_{FE} per specification)
I_E	emitter current
I_{EBO}	emitter-cutoff current, collector open
$I_{s/b}$	second-breakdown collector current
MAG	maximum available amplifier gain
MAG_c	maximum available conversion gain
MUG	maximum usable amplifier gain
P_{BE}	total dc or average power input to base (common emitter)
p_{BE}	total instantaneous power input to base (common emitter)
P_{CB}	total dc or average power input to collector (common base)
p_{CB}	total instantaneous power input to collector (common base)
P_{CE}	total dc or average power input to collector (common emitter)
p_{CE}	total instantaneous power input to collector (common emitter)
P_{EB}	total dc or average power input to emitter (common base)
p_{EB}	total instantaneous power input to emitter (common base)
P_{IB}	large-signal input power (common base)
P_{ib}	small-signal input power (common base)
P_{IE}	large-signal input power (common emitter)
P_{ie}	small-signal input power (common emitter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RCA Transistor

P_{ob}	large-signal output power (common base)
P_{ob}	small-signal output power (common base)
P_{oe}	large-signal output power (common emitter)
P_{oe}	small-signal output power (common emitter)
P_T	total nonreactive power input to all terminals
Q_s	stored base charge
$r_{bb'}$	intrinsic base spreading resistance
$r_b'C_c$	collector - to - base time constant
$r_{CE}(sat)$	collector-to-emitter saturation resistance
$Re(h_{ie})$	real part of small-signal input impedance, short circuit (common emitter)
R_G	generator resistance
R_{ie}	input resistance (common emitter)
R_L	load resistance
R_{oe}	output resistance (common emitter)
R_s	source resistance
τ (thermal)	thermal time constant
V_{BB}	base-supply voltage
V_{BC}	base-to-collector voltage
V_{BE}	base-to-emitter voltage
$V_{BE}(sat)$	base-to-emitter saturation voltage
$V_{(BR)CBO}$	collector-to-base breakdown voltage, emitter open
$V_{(BR)CEO}$	collector - to - emitter breakdown voltage, base open
$V_{(BR)CER}$	collector - to - emitter breakdown voltage, specified resistance between base and emitter
$V_{(BR)CES}$	collector - to - emitter breakdown voltage, base short-circuited to emitter
$V_{(BR)CEV}$	collector - to - emitter breakdown voltage, specified voltage between base and emitter
$V_{(BR)EBO}$	emitter-to-base breakdown voltage, collector open
V_{CB}	collector-to-base voltage
$V_{CB}(fl)$	dc open-circuit voltage between collector and base (floating potential), emitter biased with respect to base
$V_{CE}(fl)$	dc open-circuit voltage between collector and emitter (floating potential), base biased with respect to emitter
V_{CBO}	collector-to-base voltage (emitter open)
V_{CBV}	collector-to-base voltage, specified voltage between emitter and base
V_{CC}	collector-supply voltage
V_{CE}	collector-to-emitter voltage
V_{CEO}	collector-to-emitter voltage, base open
V_{CER}	collector-to-emitter voltage, specified resistance between base and emitter
V_{CES}	collector-to-emitter voltage, base short-circuited to emitter
V_{CEV}	collector-to-emitter voltage, specified voltage between base and emitter
$V_{CE}(sat)$	collector-to-emitter saturation voltage
V_{EB}	emitter-to-base voltage
$V_{EB}(fl)$	dc open-circuit voltage between emitter and base (floating potential), collector biased with respect to base
V_{EBO}	emitter-to-base voltage, collector open
V_{EE}	emitter-supply voltage
V_{RT}	reach-through voltage
VG	voltage gain
$1/Y_{22(real)}$	real part of short-circuit output impedance
Y_{fe}	forward transconductance
Y_{ie}	input admittance
Y_{oe}	output admittance
Y_{re}	reverse transconductance

MOS FIELD-EFFECT TRANSISTOR SYMBOLS

A	voltage amplification ($= Y_{fs}/Y_{os} + Y_L$)
B_{os}	$= c_{ds}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Symbols

c_e	intrinsic channel capacitance
c_{ds}	drain-to-source capacitance (includes approximately 1-pF drain-to-case and interlead capacitance)
c_{gd}	gate-to-drain capacitance (includes 0.1-pF interlead capacitance)
c_{gs}	gate-to-source interlead and case capacitance
C_{iss}	small-signal input capacitance, short circuit
C_{oss}	small-signal output capacitance, short circuit
C_{rss}	small-signal reverse transfer capacitance, short circuit
e_n	equivalent input noise voltage
g_c	forward conversion conductance
g_{fs}	forward transconductance
$g_{fs}(c)$	forward conversion transductance
$g_{fs}(off)$	cutoff forward transconductance
g_{is}	input conductance
g_{os}	output conductance
G_{ps}	power gain
$G_{ps(c)}$	conversion power gain
I_D	dc drain current
$I_{DS}(OFF)$	drain-to-source OFF current
I_{DSS}	zero-bias drain current
I_{G1SS}	gate No. 1 leakage current
I_{G2SS}	gate No. 2 leakage current
I_{GSS}	gate leakage current
NF	spot noise figure (generator resistance R_G = 1 megohm)
r_e	effective gate series resistance
r_d	active channel resistance
r_d'	unmodulated channel resistance
$r_{DS}(ON)$	drain-to-source ON resistance
$R_{DS}(off)$	drain-to-source cutoff resistance
r_{gd}	gate-to-drain leakage resistance
r_{gs}	gate-to-source leakage resistance
r_{is}	input resistance
r_{os}	output resistance
V_{DB}	drain-to-substrate voltage
V_{DG}	drain-to-gate voltage
V_{DG1}	drain-to-gate No. 1 voltage
V_{DG2}	drain-to-gate No. 2 voltage
V_{DS}	drain-to-source voltage
V_{G1S}	gate No. 1-to-source voltage
$V_{G1S}(off)$	gate N.o 1-to-source cutoff voltage
V_{G2S}	gate No. 2-to-source voltage
$V_{G2S}(off)$	gate No. 2-to-source cutoff voltage
V_{GB}	dc gate-to-substrate voltage
v_{GB}	peak gate-to-substrate voltage
V_{GS}	dc gate-to-source voltage
v_{GS}	peak gate-to-source voltage
$V_{GS}(OFF)$	gate-to-source cutoff voltage
V_o	offset voltage
Y_{fs}	forward transadmittance $\approx g_{fs}$
Y_{os}	output admittance = $g_{os} + jB_{os}$, $B_{os} = \omega C_{os}$
Y_L	load admittance = $g_L + jB_L$
$\angle\theta$	phase angle of forward transadmittance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

National Semiconductor

Audio, Radio and TV Circuits

LM1596/LM1496 Balanced Modulator-Demodulator

General Description

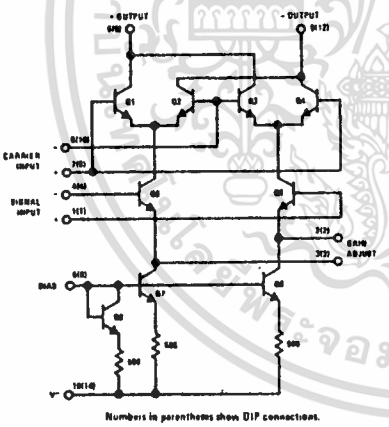
The LM1596/LM1496 are double balanced modulator-demodulators which produce an output voltage proportional to the product of an input (signal) voltage and a switching (carrier) signal. Typical applications include suppressed carrier modulation, amplitude modulation, synchronous detection, FM or PM detection, broadband frequency doubling and chopping.

The LM1596 is specified for operation over the −55°C to +125°C military temperature range. The LM1496 is specified for operation over the 0°C to +70°C temperature range.

Features

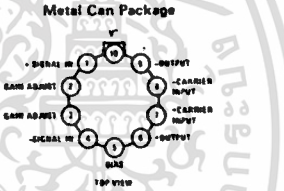
- Excellent carrier suppression
  - 65 dB typical at 0.5 MHz
  - 50 dB typical at 10 MHz
- Adjustable gain and signal handling
- Fully balanced inputs and outputs
- Low offset and drift
- Wide frequency response up to 100 MHz

Schematic and Connection Diagrams



Numbers in parentheses show DIP connections.

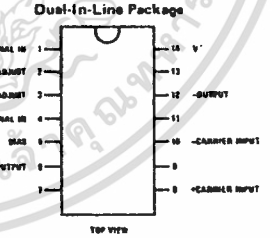
Metal Can Package



Note: Pin 10 is connected electrically to the case through the device substrate.

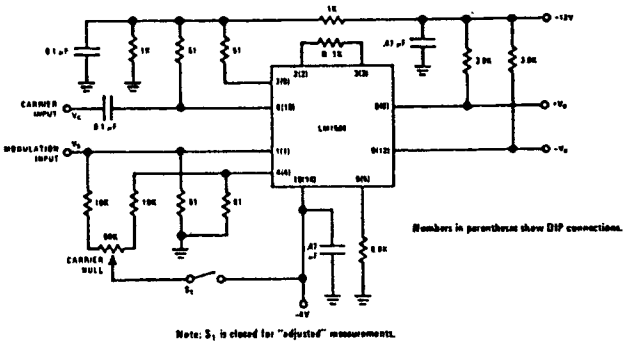
Order Number LM1496H or LM1596H
See NS Package H08C

Dual-In-Line Package



Order Number LM1496N
See NS Package N14A

Typical Application and Test Circuit



Note: S_1 is closed for "adjusted" measurements.

Suppressed Carrier Modulator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

Internal Power Dissipation (Note 1)	500 mW
Applied Voltage (Note 2)	30V
Differential Input Signal ($V_7 - V_8$)	±5.0V
Differential Input Signal ($V_4 - V_1$)	$\pm(5+I_8R_e)$ V
Input Signal ($V_2 - V_1$, $V_3 - V_4$)	5.0V
Bias Current (I_8)	12 mA
Operating Temperature Range LM1596	−55°C to +125°C
LM1496	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	−65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	300°C

Electrical Characteristics (T_A = 25°C, unless otherwise specified, see test circuit)

PARAMETER	CONDITIONS	LM1596			LM1496			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Carrier Feedthrough	V_C = 60 mVrms sine wave f_C = 1.0 kHz, offset adjusted		40			40		μVrms
	V_C = 60 mVrms sine wave f_C = 10 MHz, offset adjusted		140			140		μVrms
	V_C = 300 mV_{pp} square wave f_C = 1.0 kHz, offset adjusted		0.04	0.2		0.04	0.2	mVrms
	V_C = 300 mV_{pp} square wave f_C = 1.0 kHz, offset not adjusted		20	100		20	150	mVrms
Carrier Suppression	f_S = 10 kHz, 300 mVrms f_C = 500 kHz, 60 mVrms sine wave offset adjusted	50	65		50	65		dB
	f_S = 10 kHz, 300 mVrms f_C = 10 MHz, 60 mVrms sine wave offset adjusted		50			50		dB
Transadmittance Bandwidth	R_L = 50Ω Carrier Input Port, V_C = 60 mVrms sine wave f_S = 1.0 kHz, 300 mVrms sine wave		300			300		MHz
	Signal Input Port, V_S = 300 mVrms sine wave $V_7 - V_8$ = 0.5Vdc		80			80		MHz
Voltage Gain, Signal Channel	V_S = 100 mVrms, f = 1.0 kHz $V_7 - V_8$ = 0.5Vdc	2.5	3.5		2.5	3.5		V/V
Input Resistance, Signal Port	f = 5.0 MHz $V_7 - V_8$ = 0.5 Vdc		200			200		kΩ
Input Capacitance, Signal Port	f = 5.0 MHz $V_7 - V_8$ = 0.5 Vdc		2.0			2.0		pF
Single Ended Output Resistance	f = 10 MHz		40			40		kΩ
Single Ended Output Capacitance	f = 10 MHz		5.0			5.0		pF
Input Bias Current	$(I_1 + I_4)/2$		12	25		12	30	μA
Input Bias Current	$(I_7 + I_8)/2$		12	25		12	30	μA
Input Offset Current	$(I_1 - I_4)$		0.7	5.0		0.7	5.0	μA
Input Offset Current	$(I_7 - I_8)$		0.7	5.0		5.0	5.0	μA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current	(−55°C < T_A < +125°C) (0°C < T_A < +70°C		2.0			2.0		nA/°C nA/°C
Output Offset Current	$(I_6 - I_9)$		14	50		14	60	μA
Average Temperature Coefficient of Output Offset Current	(−55°C < T_A < +125°C) (0°C < T_A < +70°C)		90			90		nA/°C nA/°C
Signal Port Common Mode Input Voltage Range	f_S = 1.0 kHz		5.0			5.0		V_{p-p}
Signal Port Common Mode Rejection Ratio	$V_7 - V_8$ = 0.5 Vdc		−85			−85		dB
Common Mode Quiescent Output Voltage			8.0			8.0		Vdc
Differential Output Swing Capability			8.0			8.0		V_{p-p}
Positive Supply Current	$(I_6 + I_9)$		2.0	3.0		2.0	3.0	mA
Negative Supply Current	(I_{10})		3.0	4.0		3.0	4.0	mA
Power Dissipation			33			33		mW

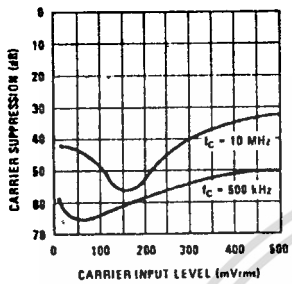
Note 1: LM1596 rating applies to case temperatures to +125°C; derate linearly at 6.5 mW/°C for ambient temperature above 75°C. LM1496 rating applies to case temperatures to +70°C.

Note 2: Voltage applied between pins 6-7, 8-1, 9-7, 9-8, 7-4, 7-1, 8-4, 6-8, 2-5, 3-5.

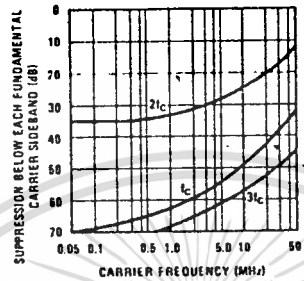
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Characteristics

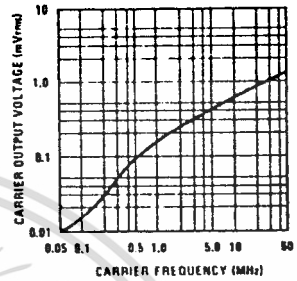
Carrier Suppression vs Carrier Input Level



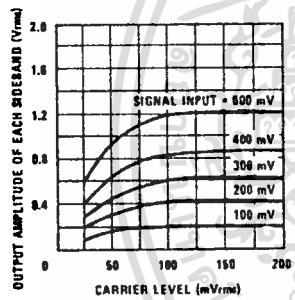
Carrier Suppression vs Frequency



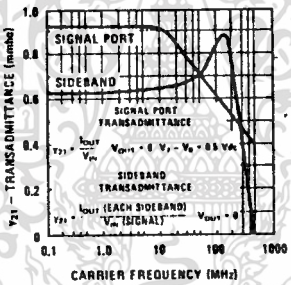
Carrier Feedthrough vs Frequency



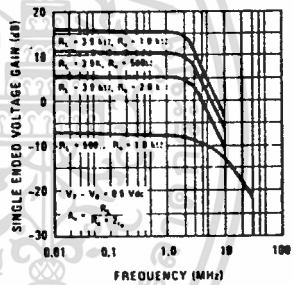
Sideband Output vs Carrier Levels



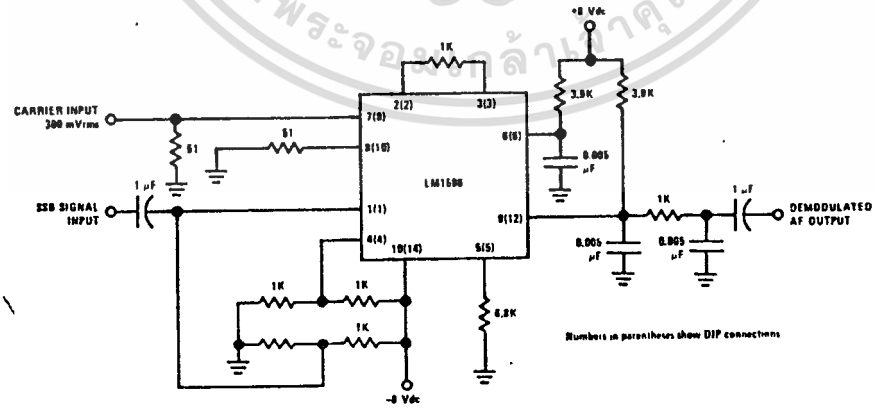
Sideband and Signal Port Transadmittances vs Frequency



Signal-Port Frequency Response



Typical Applications (Continued)

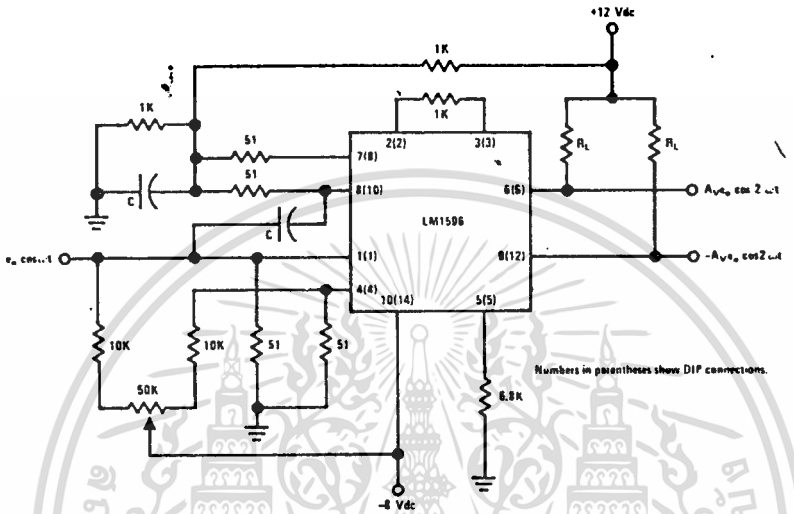


SSB Product Detector

This figure shows the LM1596 used as a single sideband (SSB) suppressed carrier demodulator (product detector). The carrier signal is applied to the carrier input port with sufficient amplitude for switching operation. A carrier input level of 300 mVrms is optimum. The composite SSB signal is applied to the signal input port with an amplitude of 5.0 to 500 mVrms. All output signal components except the desired demodulated audio are filtered out, so that an offset adjustment is not required. This circuit may also be used as an AM detector by applying composite and carrier signals in the same manner as described for product detector operation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)



Broadband Frequency Doubler

The frequency doubler circuit shown will double low-level signals with low distortion. The value of C should be chosen for low reactance at the operating frequency.

Signal level at the carrier input must be less than 25 mV peak to maintain operation in the linear region of the switching differential amplifier. Levels to 50 mV peak may be used with some distortion of the output waveform. If a larger input signal is available a resistive divider may be used at the carrier input, with full signal applied to the signal input.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชา **PROJECT II** ปีการศึกษา 2532 สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ซึ่งได้รับความช่วยเหลือจากท่านอาจารย์ **ประดิษฐ์ วัชรพิบูลย์** ซึ่งให้คำปรึกษาและแนะแนวทางการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น และเพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจึงทำให้ผลงานชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ข้าพเจ้า จึงขอบคุณมา ณ ที่นี้

กำพล อุณหกาญจน์กิจ
สมชัย หวังวิบูลย์ชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. ประสิทธ์ ประพิณมงคลการ , ดร. , " แองเกิลโมดูเลชั่น " , หลักการระบบสื่อสาร , ซีเอ็ดยูเคชั่น , 2533 , หน้า 93 - 140
2. ประกิจ ตังสิสานนท์ , ผศ. , " ออสซิเลเตอร์ " , วิศวกรรมการสื่อสาร , สจ.ล. , 2527 , หน้า 151 - 164
3. บรรเจิด ตันติกัลยาภรณ์ , " การพันคอยล์ให้ได้ค่า L ตามต้องการ " , เครื่องรับส่ง เล่ม 2 , 2531 , หน้า 70 - 77
4. สุชาติ กังวารจิตต์ , ร.ต.อ. , " เครื่องรับส่งวิทยุสื่อสาร " , หลักการทำงานเครื่องรับส่งวิทยุและระบบวิทยุสื่อสาร , ซีเอ็ดยูเคชั่น , 2530 , หน้า 130 - 166
5. NHK Central Training Institute , " Fundamentals of FM Stereophonic Broadcasts " , FM Stereophonic Transmission Technique , Japan International Cooperation Agency (JICA) , 1972 , pp. 1 - 82
6. Linear Databook , National Semiconductor , 1980 , pp. 10-84 to 10-87
7. Radio Amature Handbook , 1989 , pp. 122 -148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้