

เครื่องส่งสัญญาณภาพไร้สาย

WIRELESS VIDEO SIGNAL TRANSMITTER



T123703



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....123703
วัน, เดือน, ปี.....23 11 2553

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องส่งสัญญาณภาพไร้สาย

WIRELESS VIDEO SIGNAL TRANSMITTER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

ผ่านการตรวจงานแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (ลงชื่อ).....

ผ่านการตรวจแปลแล้ว

(ลงชื่อ).....

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องส่งสัญญาณภาพไร้สาย

WIRELESS VIDEO SIGNAL TRANSMITTER

ผู้จัดทำ

1. นายวัชรพล

น้อยวัฒนกุล

50011431

(รศ.ดร.ยุทธพงษ์

รังสรรค์เสรี)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ เพราะได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี ที่กรุณาให้ความเมตตารับเป็นที่ปรึกษาโครงการ ดูแลให้คำแนะนำ เสนอแนะแนวทาง ตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง ให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำโครงการมาโดยตลอด ให้คำปรึกษา แนะนำ ข้อมูลวงจร VIDEO SENDER เทคนิคต่างๆ แหล่งเรียนรู้และอำนวยความสะดวกในการสืบค้น ข้อมูลประกอบการจัดทำโครงการขึ้นนี้ ทางผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณอาจารย์มา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำโครงการหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการที่จัดทำขึ้นนี้จะเกิดคุณค่าและประโยชน์แก่ผู้สนใจที่จะนำไปศึกษาต่อในประเด็นที่ได้เสนอแนะไว้ในรายงานฉบับนี้ หรือ เพื่อเป็นแนวทางในการจัดทำโครงการอื่นที่เกี่ยวข้องให้บรรลุผลอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

นายวัชรพล น้อยวัฒนกุล
ผู้จัดทำ

เครื่องส่งสัญญาณภาพไร้สาย

WIRELESS VIDEO SIGNAL TRANSMITTER

โดย นายวัชรพล น้อยวัฒนกุล 50011431

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นโครงการสร้างเครื่องส่งสัญญาณภาพจากเครื่องเล่นวิดีโอซีดี โดยการนำสัญญาณภาพจากพอร์ต RGB-COMPOSITE ไปมอดูเลตด้วยความถี่แล้วส่งออกทางคลื่นวิทยุไปยังจอภาพ

ABSTRACT

This project presents an implementation of image transmission from VCD player. The video signal from RGB-composite port will be modulated with high frequency carrier and sent via radio wave to the television.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1	
บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2	
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การแพร่กระจายคลื่น (PROPAGATION OF WAVES)	3
2.2 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ	19
2.3 การสื่อสารในระบบอนาล็อก (Analog communications)	41
บทที่ 3	
การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์	
3.1 วงจรส่งสัญญาณวีดีโอ	75
3.2 วงจรภาคส่งสัญญาณเสียง	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การทดสอบวงจรกำหนดความถี่	83
4.2 การทดสอบวงจรขยาย	84
4.3 การทดสอบวงจรมอดูเลตทางแอมพลิจูด	84
4.4 การหาค่ากำลังส่งของเครื่องส่งสัญญาณ	86
4.5 การทดสอบระยะการส่งสัญญาณของเครื่องส่ง	86
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	89
บรรณานุกรม	90
ภาคผนวก ก DATASHEET C1674	91
ภาคผนวก ข DATASHEET C945	92

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	บล็อกไดอะแกรมการส่งสัญญาณ	2
2.1	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศว่าง	5
2.2	หน้าคลื่นรูปทรงกลม	6
2.3	การดูคลื่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชั้นบรรยากาศ	11
2.4	การสะท้อนของคลื่น	12
2.5	การหักเหของคลื่น	13
2.6	การหักเหของคลื่นในตัวกลางที่ความหนาแน่นค่อยๆลดลงอย่างเชิงเส้น	15
2.7	การแทรกแซงของสัญญาณตรงกับสัญญาณสะท้อน	16
2.8	รูปแบบการแผ่พลังงาน(RADIATION PATTERN) จากการแทรกแซง	16
2.9	การเลี้ยวเบน(Diffraction) (a) เกิดจากหน้าคลื่นทรงกลม (b) จากหน้าคลื่นแนวระนาบ (c) เกิดจากช่องเล็ก ๆ	17
2.10	การเลี้ยวเบนรอบๆมุมสิ่งกีดขวาง	18
2.11	เครื่องรับที่อยู่ใกล้สถานีส่งจะรับสัญญาณได้แรงกว่าเครื่องรับที่อยู่ไกลออกไปจากสถานีส่ง	19
2.12	การเดินทางของคลื่นดิน	20
2.13	การลดทอนของคลื่นดินที่ความถี่ต่างๆ	21
2.14	การเดินทางของคลื่นอากาศ	22
2.15	การเดินทางของคลื่นไฟฟ้า	23
2.16	ชั้นไอโอโนสเฟียร์แบ่งเป็นชั้นย่อยอีกหลายชั้น	24
2.17	ชั้นบรรยากาศรอบโลก	25
2.18	คลื่นวิทยุค่อยๆ ผ่านชั้นบรรยากาศชั้นบางๆ	26
2.19	ระยะสูงเสมือนของชั้นไอโอโนสเฟียร์	26
2.20	การหักเหของคลื่นวิทยุที่มุมยิงค่าต่างๆ	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.21	ความถี่ใช้งานสูงสุด ในที่นี้เท่ากับ 20 MHz ที่มียกข้อกำหนดให้เพื่อให้หัก เหลงมายังจุด A	28
2.22	การหักเหของคลื่นที่ความถี่ต่าง ๆ สำหรับชั้น ไอโอโนสเฟียร์ชั้นย่อย	29
2.23	การสื่อสารแบบที่คลื่นเดินทาง 2 ฮอป	30
2.24	การรับสัญญาณมัลติพาธ	31
2.25	การเปลี่ยนแปลงของชั้น ไอโอโนสเฟียร์ประจำวัน	32
2.26	การเปลี่ยนแปลงของชั้น F2 ในฤดูร้อนกับฤดูหนาว	34
2.27	จุดของดวงอาทิตย์ (รูป ก.) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ ไอโอโนสเฟียร์ (ตามรูป ข.)	35
2.28	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของชั้น F2 ทั้ง ทวนจุดดับ ในดวงอาทิตย์ มากที่สุดและน้อยสุด	36
2.29	ระยะสายตา	38
2.30	การแปรคลื่นแบบโทรโปสเฟียร์	39
2.31	การสื่อสารผ่านดาวเทียม	40
2.32	พื้นที่ใช้งานของดาวเทียม	41
2.33	ดาวเทียมประจำ ชาติและพื้นที่ใช้งาน	42
2.34	สัญญาณทางเวลาและทางความถี่ของสัญญาณที่มอดูเลต	44
2.35	สัญญาณ DSB-LC (AM) ทางเวลาและความถี่	46
2.36	สัญญาณ DSB-LC แสดงให้เห็นเมื่อสัญญาณที่เข้ามามอดูเลตมีขนาดสูง กว่าพาหะ	47
2.37	สัญญาณ AM ที่ มอดูเลตด้วยดัชนีมอดูเลตต่างกัน	48
2.38	สเปกตรัมของสัญญาณ SSB	50
2.39	SSB modulator ใช้ การกรองส่วน upper sideband	51
2.40	ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองสำหรับ VSB	51
2.41	สเปกตรัมของสัญญาณโทรทัศน์	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.42	บล็อกโคอะแกรมการสร้างสัญญาณ DSB-LC	53
2.43	วงจรกรองสำหรับสัญญาณ AM	54
2.44	การสร้างสัญญาณ DSB-SC จาก AM	54
2.45	วงจรมอดูเลเตอร์ มอดูเลเตอร์ ที่ใช้อุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น	54
2.46	วงจรมอดูเลเตอร์สัญญาณ DSB แบบ chopper ที่ใช้สวิตช์แม่เหล็กและใช้ไดโอดเป็นสวิตช์	55
2.47	วงจรมอดูเลเตอร์สัญญาณ AM แบบ chopper	56
2.48	การสร้างสัญญาณ SSB โดยวิธีเลื่อนเฟส	56
2.49	เอ็นเวลโลปดิเทคเตอร์	57
2.50	การคิมอดูเลตสัญญาณ DSB-SC	59
2.51	เครื่องรับวิทยุ (ก) แบบ TRF (ข) แบบ SUPERHETERODYNE	60
2.52	การมัลติเพล็กซ์ทางความถี่ (FDM)	61
2.53	สัญญาณ PM และ FM เมื่อมอดูเลตด้วยสัญญาณสี่เหลี่ยม	62
2.54	เปรียบเทียบสเปกตรัม AM และ NBFM	64
2.55	เบสเชลฟิงค์ชันที่ค่า B และ N ต่างๆ	65
2.56	เส้นสเปกตรัมสัญญาณ FM ที่ค่าต่างๆ	66
2.57	เส้นสเปกตรัมสัญญาณ FM ที่ B ค่าต่างๆ (ก) f_{Δ} คงที่ \pm (5KHZ) (ข) FM คงที่ (2KHZ)	67
2.58	รูปแบบสเปกตรัมเมื่อมอดูเลตด้วยสัญญาณต่างกัน	68
2.59	วงจรสร้างความถี่ พาหะ โดยใช้ VARACTOR	70
2.60	วงจรมอดูเลตที่ใช้ VCO (IC 566)	70
2.61	ARMSTRONG MODULATOR สำหรับความถี่ VHF	71
2.62	DISCRIMINATOR ACTION	73
2.63	รูปคลื่นแสดงการเปรียบเทียบเฟส ค่าเฉลี่ยของผลคูณสัญญาณจะแปรตามการเปลี่ยนแปลงเฟส	73
2.64	วงจร PHASE -LOCKED LOOP	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 วงจรส่งสัญญาณวิดีโอ	75
3.2 วงจรกำเนิดความถี่แบบ LC	76
3.3 วงจรขยายสัญญาณ	78
3.4 วงจรกำเนิดความถี่แบบ LC	81
3.5 การเชื่อมต่อระหว่างวงจรภาคส่งเสียงกับวงจรภาคส่งภาพ	82
4.1 สัญญาณจากวงจรกำเนิดความถี่	83
4.2 สัญญาณที่ได้จากวงจรขยาย	84
4.3 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตกับคลื่นพาห้	85
4.4 สเปกตรัมของสัญญาณที่ทำการมอดูเลตกับคลื่นพาห้	85
4.5 สัญญาณภาพที่ได้จากเครื่องเล่นวิดีโอ	86
4.6 ภาพที่ได้จากระยะ 1 ถึง 4 เมตร	87
4.7 ภาพที่ได้จากระยะ 6 เมตร	87
4.8 ภาพที่ได้จากระยะ 8 เมตร	88
4.9 ภาพที่ได้จากระยะเกิน 10 เมตรขึ้นไป	88

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	การเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อปรับเปลี่ยนค่า VC_1 กำหนดได้จากสูตร	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

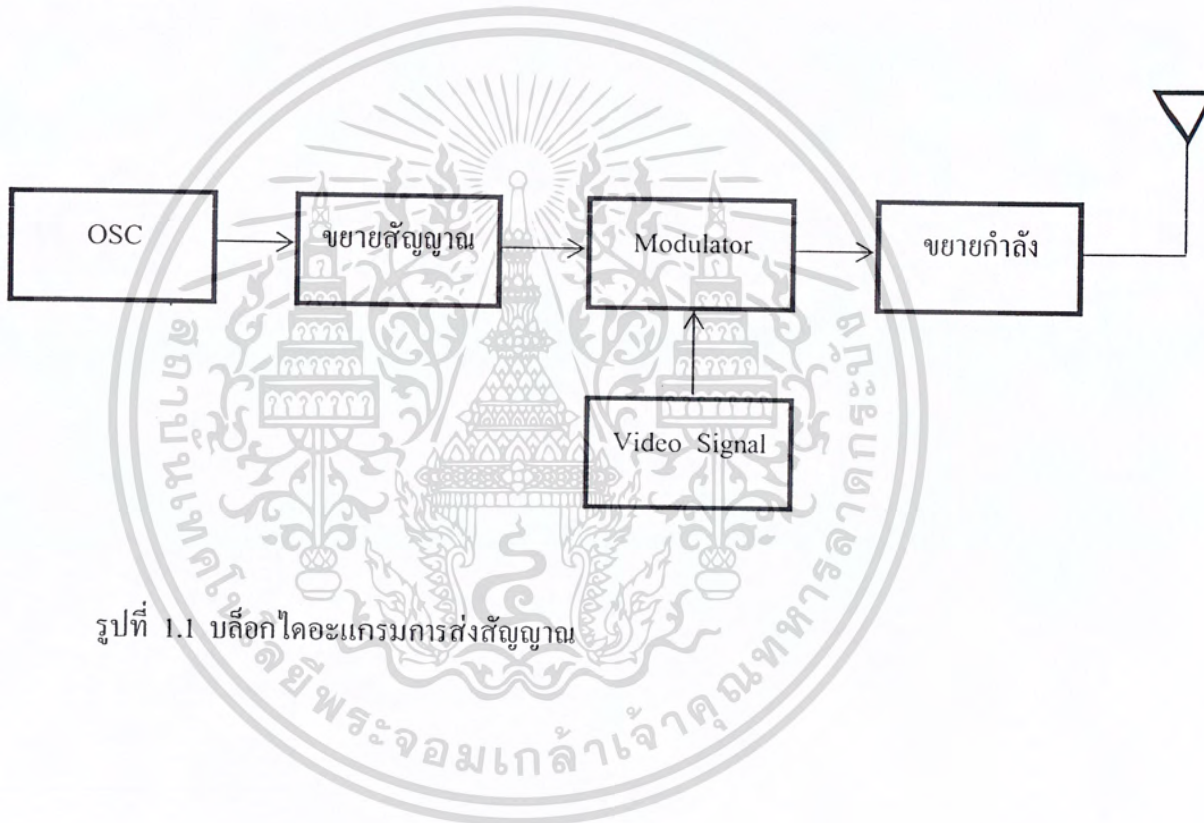
จากความเจริญเติบโตทางธุรกิจและการแข่งขันทางเทคโนโลยีที่ไม่หยุดยั้งเป็นผลให้ต้องมีการเสาะหาแนวทางการสื่อสารทางสื่อใหม่ๆ เพื่อตอบสนองความจำเป็นในการติดต่อสื่อสาร อีกทั้งยังต้องมีความแน่นอนและรวดเร็วซึ่งภายในองค์กรภาคธุรกิจต้องการการนำเสนอข้อมูลในการประชุมหรือแสดงผลงานภายในองค์กรที่มีพื้นที่ไม่มากนัก จึงได้ออกแบบอุปกรณ์เครื่องรับส่งข้อมูลภาพผ่านช่องสัญญาณคลื่นความถี่สาธารณะ เพื่อความสะดวกและประหยัด อีกทั้งยังนำไปใช้งานง่ายเหมาะสำหรับองค์กรทางธุรกิจที่เพิ่งก่อตั้งและภาครัฐอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาการทำงานของมอดูเลเตอร์ความถี่
2. ศึกษาการทำงานของวงจรในส่วนปลีกย่อยที่ต้องนำมาใช้ในการเชื่อมต่อกับวงจรในภาคหลัก
3. เพื่อทำการสร้างอุปกรณ์ส่งผ่านสัญญาณVIDEO โดยใช้ย่านความถี่VHF
4. เพื่อเพิ่มความสะดวกในการส่งผ่านสัญญาณภาพจากเครื่องเล่นวีดีโอ/ซีดี ไปยังโทรทัศน์แบบหลายเครื่อง

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

1. สามารถใช้ย่านความถี่ VHF ในการส่งสัญญาณภาพจากเครื่องเล่นวิดีโอ/ซีดี ไปยังโทรทัศน์แบบหลายเครื่องได้
2. สามารถส่งสัญญาณภาพจากเครื่องเล่นวิดีโอ/ซีดี ไปสู่เครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมการส่งสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแพร่กระจายคลื่น (Propagation of waves)

ตามที่เราทราบแล้วว่าในระบบสื่อสาร การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ ต้องส่งสัญญาณผ่านตัวกลาง ตัวกลางที่เรารู้จักและคุ้นเคยแล้วก็คือสายส่ง เช่น สายโทรศัพท์ สายเคเบิลใยแก้ว เป็นต้น ยังมีตัวกลางอีกประเภทที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในปัจจุบันและในอนาคตด้วย นั่นคืออากาศ หรือ อวกาศ เป็นตัวกลางที่สามารถมาได้ฟรี มีอยู่ทั่วไปและตลอดไป การรับส่งสัญญาณผ่านตัวกลางประเภทนี้ต้องผ่านทางสายอากาศ ด้วยวิธีการแพร่กระจายคลื่น

ในส่วนแรกจะทบทวนถึงการแผ่พลังงาน (radiation) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ธรรมชาติการแพร่กระจายคลื่น (propagation) วิทยู การลดทอน (attenuation) และการดูดกลืน (absorption) เมื่อคลื่น เดินทาง ตลอดจนการสะท้อน (reflection) การหักเห (refraction) การแทรกสอด (interference) และ การเลี้ยวเบน (diffraction)

ส่วนที่สองจะกล่าวถึงรายละเอียดการแพร่กระจายคลื่น สามวิธีหลักของการแพร่กระจายคลื่น ส่วนโค้งของโลกกับการแพร่กระจายคลื่น โดยรอบๆ ด้วยวิธีการสะท้อนผ่านทางชั้นบรรยากาศ หรือการ ส่งทางตรง การแพร่กระจายคลื่น ไมโครเวฟ ผลจากชั้นบรรยากาศเมื่อคลื่นเดินทางผ่าน

2.1.1. การแผ่พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อกำลังงานไฟฟ้าถูกป้อนเข้าไปในวงจรซึ่งมีส่วนประกอบเป็นรีแอคทีฟ เช่น ตัวเหนี่ยวนำ (inductor) จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า กำลังงานส่วนหนึ่งจะหลุดออกไปอวกาศว่าง (free space) เราเรียกว่าเกิดการแผ่พลังงาน (radiation) และกำลังงานนี้ จะแพร่ออกไปในอวกาศว่าง ในรูปแบบที่เราเรียก กันว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อวกาศว่าง (free space) คือที่ว่างเปล่า ซึ่งไม่มีการสอดแทรกจากการแผ่ พลังงานและการแพร่กระจายคลื่นวิทยู ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กและสนามโน้มถ่วง ไม่มีวัตถุแข็งและ ไม่มีอนุภาคไอออน ความจริงแล้วอวกาศว่างดูเหมือนว่าไม่เคยมีจริงที่ไหนเลยและคงไม่อยู่ใกล้โลกแน่นอนอนอย่างไรก็ตามแนวความคิดที่ใช้อวกาศว่างก็เพราะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเข้าถึงการแพร่กระจายคลื่นเป็นไปอย่างง่ายทำให้เป็นไปได้ในการคำนวณที่สภาวะต่างๆ จากที่ว่างเปล่า แล้วจึงพยากรณ์ผลจากคุณสมบัติจริง บางครั้งสภาวะการแพร่กระจายก็ใช้ค่าประมาณการจากอวกาศว่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่เหนือกว่าย่าน UHF การแผ่พลังงานและการแพร่กระจายคลื่นวิทยุไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา ดังนั้นการอธิบายทั้งหมดจึงอาศัยพื้นฐานทางทฤษฎีและยอมรับได้เพียงเป็นค่าทางการพยากรณ์ เช่น ใช้เพื่อการทำนายว่าจะเกิดอะไรขึ้นต่อไป ทฤษฎีของการแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ถูกเสนอข้อคิดเห็นโดยนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ชื่อ เจมส์ เคลิร์ก แมกเวลล์ (James Clerk Maxwell) ในปี ค.ศ. 1857 และสุดท้ายในปี ค.ศ. 1873

2.1.1.1 หลักมูลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การแกว่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายในอวกาศว่าง (free-space) จะมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสงคือ

$$v_c = 299,792,500 \pm 300 \text{ m/s} \\ \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

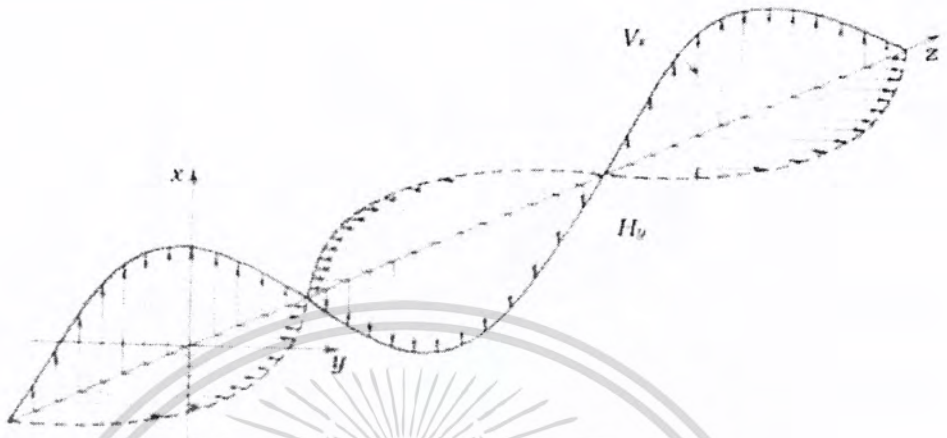
เป็นค่าคงที่ที่ได้มาจาก

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

เมื่อ

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$\epsilon_0 = 1/36\pi \times 10^9 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$



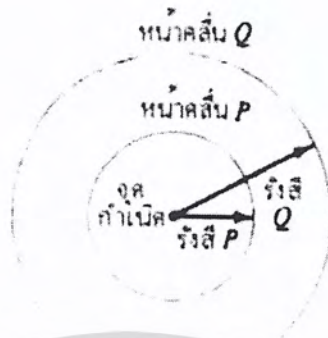
รูปที่ 2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศว่าง

การแพร่กระจายคล้ายๆกับการเคลื่อนที่ออกของคลื่นหลังจากที่เราโยนก้อนหินลงในสระน้ำ แต่ก็มี ข้อแตกต่างกันอย่างมาตรงที่คลื่นน้ำเป็น Longitudinal คือ แกว่งในทิศทางเดียวกันกับทิศทาง การแพร่กระจาย ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็น Transverse คือ แกว่งในทิศทางตั้งฉากกันกับทิศทาง การแพร่กระจาย ดังนั้น สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และทิศทาง การแพร่กระจาย ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะตั้งฉากซึ่งกันและกันดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นสมมุติฐานทางทฤษฎีที่ไม่สามารถตรวจสอบได้ เพราะเรามองไม่เห็นคลื่น แต่อย่างไรก็ตาม เราสามารถใช้ในการพยากรณ์พฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในทุก สถานะการณ์ เช่น การสะท้อน การหักเห และการเลี้ยวเบนที่จะกล่าวถึงต่อไป

คลื่นในอวกาศว่าง

เนื่องจากเราที่ไม่มีสิ่งสอดแทรกหรือสิ่งกีดขวางในอวกาศว่าง ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงสามารถแผ่จากจุดแหล่งกำเนิดออกเป็นระเบียบในทุกทิศทาง โดยมีหน้าคลื่น (Wave front) เป็นรูปทรง กลมดั่งภาพตัดแสดงในรูปที่ 2 หรือจะอธิบายง่ายๆโดยการจินตนาการว่าคือเส้นรังสีออกจากศูนย์กลาง ของแสงในทุกทิศทางมาตั้งฉากกับพื้นหน้าคลื่นเหมือนกับซี่ล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 หน้าคลื่นรูปทรงกลม

ที่ระยะความยาวเท่ากับรังสี P คลื่นมีเฟสที่แน่นอน มันออกจากแหล่งกำเนิดในขณะที่แรงดันและกระแสสูงสุดถูกป้อนเข้าวงจร เช่น ที่แอมพลิจูดสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก หากระยะทางการเดินทางเท่ากันหมดที่ 100000.25 ความยาวคลื่น ความเข้มของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ช่วงเวลานั้นเท่ากับศูนย์ทุกจุดหากต่อทุกจุดที่เท่ากันนี้เป็นพื้นเดียวกัน นั่นคือค่าจำกัดความของหน้าคลื่น (Wave front) ซึ่งในที่นี้ก็คือรูปทรงกลมหากความยาวของรังสี Q ยาวเป็นสองเท่าของรังสี P พื้นที่ของทรงกลมรัศมี Q ย่อมมากกว่าเป็นสี่เท่าของพื้นที่ทรงกลมรัศมี P จะเห็นได้ว่ากำลังงานทั้งหมดจากแหล่งกำเนิดจะต้องแผ่ให้ครอบคลุมพื้นที่เป็นสี่เท่าเมื่อระยะทางห่างจากแหล่งกำเนิดเป็นสองเท่า ดังนั้นหากความเข้มของกำลังงานถูกกำหนดเป็นการแพร่กำลังงานต่อหน่วยพื้นที่แล้วที่ระยะทางห่างออกไปเป็นสองเท่า

$$P = \frac{P_t}{4\pi r^2}$$

(2.1)

ในเมื่อ

P = ความหนาแน่นกำลังงานที่ระยะทาง r ห่างจากแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก

P_t = กำลังเครื่องส่ง

แหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก เป็นชื่อของแหล่งกำเนิดที่มีการแผ่พลังงานสม่ำเสมอทุกทิศทางในอวกาศว่าง ถึงแม้ว่าแหล่งกำเนิดเช่นนี้ จะไม่มีจริงในทางปฏิบัติแต่แนวความคิดของการแผ่พลังงานชนิดไอโซทรอปิกมีประโยชน์และใช้กันบ่อยที่นำเสนออีกอย่างก็คือ แม้ว่าแหล่งกำเนิดไม่ใช่ไอโซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรอปิก กฎของ ส่วนกลับกำลังสองก็ยังนำมาใช้สำหรับหน้าคลื่นรูปทรงกลม ความเร็วของการแผ่พลังงานจะต้องคงที่ทุกๆจุด และตัวกลางที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายถูกต้องเช่นนี้ ก็เรียกว่าไอโซทรอปิก เช่นเดียวกัน

ความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็มีความสำคัญมากปริมาณของ ทั้งสองสิ่งนี้เป็นส่วน โดยตรงของแรงแดันและกระแสในวงจร หน่วยของการวัดเป็นโวลต์ต่อเมตรและแอมแปร์ ต่อเมตรตามลำดับ

$$\begin{aligned} \text{สำหรับวงจรไฟฟ้าเรามี} & \quad V = ZI \\ \text{ดังนั้นสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า} & \quad E = ZH \end{aligned} \quad (2.2)$$

ในเมื่อ

E = ค่า rms ของความแรงสนาม (field strength) หรือ ความเข้ม มีหน่วยเป็น V/m

H = ค่า rms ของความแรงสนาม (field strength) แม่เหล็ก หรือ ความเข้ม มีหน่วยเป็น A/m

Z = อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance) ของตัวกลาง มีหน่วยเป็น Ω

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของตัวกลางหาได้จาก

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.3)$$

เมื่อ

μ = ความซึมซับได้ (permeability) ของตัวกลาง

ϵ = สภาพยอม (permittivity) ทางไฟฟ้าของตัวกลาง

สำหรับในอวกาศว่าง

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-6} \text{ H / m}$$

$$\epsilon = 1/36\pi \times 10^9 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F / m}$$

จากหน่วยของทั้งสองค่านี้เราก็จะพอทราบได้ว่า ความซึมซับได้เป็นสมมูลของตัวเหนี่ยวนำและสภาพยอมเป็น สมมูลของตัวเก็บประจุ ในวงจรไฟฟ้า และจากสมการที่ (2.3) เราก็สามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะในอวกาศว่างได้คือ

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{1/36\pi \times 10^9}} = \sqrt{144\pi^2 \times 100}$$

$$= 120\pi = 377\Omega \quad (2.4)$$

ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะคำนวณหาความเข้มสนามที่ระยะห่าง จากแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก

และจาก $P = V^2/Z$ ในวงจรไฟฟ้า

$$\text{ดังนั้น } P = E^2/Z \text{ สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ } E = \sqrt{PZ}$$

แทนค่า P จากสมการที่ (2.1) และค่า อิมพีแดนซ์คุณลักษณะในอวกาศว่างจะได้

$$E = \sqrt{\frac{P_t}{4\pi r^2} \times 120\pi} = \sqrt{\frac{30P_t}{r^2}}$$

$$E = \frac{\sqrt{30P_t}}{r} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.5) จะเห็นได้ว่าความเข้มสนามผกผันกลับกับระยะทางจากแหล่งกำเนิด แต่ผกผันตรงกับรูทสองของความหนาแน่นกำลังงาน

สุดท้ายลองมาพิจารณาหน้าคลื่นอีกครั้ง ดังที่เคยกล่าวมาแล้วว่าหน้าคลื่นเป็นรูปเชิงทรงกลมใน ตัวกลางไอโซทรอปิกแต่ในกรณีพื้นที่น้อยแค่ระยะทางไกลจากแหล่งกำเนิดมากเราสามารถพิจารณาหน้าคลื่นเป็นเชิงระนาบได้ ซึ่งเห็นได้ชัดทางเรขาคณิตจากค่าบัพที่ดั่งและจากที่เราประสบบ่อยๆ เช่น เราจะ บอกว่าสนามฟุตบอลมีลักษณะแบน แม้จะรู้ว่าโลกเป็นรูปทรงกลมแต่เมื่อพิจารณาระยะทางจากจุด ศูนย์กลางมายังผิวเทียบกับพื้นที่สนามฟุตบอลซึ่งน้อยมากแนวคิดเรื่องคลื่นเชิงระนาบนี้มีประโยชน์มาก เพราะทำให้เข้าใจง่ายต่อวิธีแสดงคุณสมบัติทางแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น การสะท้อนและการหักเห

การแผ่พลังงานและการรับ สายอากาศเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือการแพร่กระจายเป็นผลจากการไหลของกระแสความถี่สูงในวงจรที่เหมาะสม ซึ่งสามารถพิสูจน์ทางโพลาริเซชัน (Polarization) จาก รูปที่ 2.1 เราจะเห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง โดยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากซึ่งกันและกันสนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกับเส้นลวดส่วนสนามไฟฟ้าจะขนานกับเส้นลวด และทรวดทรงนี้ก็จะเป็นรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจาย ออกไปจากเส้นลวดดังนั้นจึงเกิดขั้วของคลื่นที่แพร่กระจายจากสายอากาศเรียกว่าโพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลาไรเซชันซึ่งจะเป็นเชิงเส้นคงที่ตลอดเช่นสายอากาศชนิดแนวตั้ง (Vertical) จะแพร่กระจายคลื่น โดยเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเป็นแนวตั้งจึงเรียกว่า เวกติคอลโพลาไรซ์ (Vertical Polarized) และในรูปที่ 1 ก็จะเป็นว่า เวกติคอลโพลาไรซ์ ส่วนสายอากาศชนิดแนวนอน (Horizontal) ก็ จะแพร่กระจายคลื่น โดยเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเป็นแนวนอน จึงเรียกว่า ฮอริซนทอลโพลาไรซ์ (Horizontal Polarized) สำหรับดวงอาทิตย์การแพร่กระจายแสงจะมีเวกเตอร์สะเปะสะปะไม่แน่นอนเราจึงเรียกว่า แรนดอม โพลาไรซ์ (Random Polarized) นอกจากนี้ยังมีสายอากาศที่เรียกว่า เฮลิคอล (Helical) เวกเตอร์ไฟฟ้าของการแพร่กระจายจะหมุนเป็นวงเราจึงเรียกว่า เซอคูล่า โพลาไรซ์ (Circular Polarized) ในการติดตั้งสายอากาศส่งและรับจะต้องมีโพลาไรซ์เหมือนกันจึงจะรับสัญญาณได้ดีที่สุด

การรับ (Reception) ลวดที่มีกระแสความถี่สูงไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ล้อมรอบคั่นนั้น หากเราเอาลวดอีกเส้นไปวางในสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้ก็จะเกิดการเหนี่ยวนำในตัวมันเรา จึงพูดได้ว่าลวดได้รับส่วนของการแพร่กระจายหรือเป็นสายอากาศรับนั่นเอง แม้ว่ากระบวนการรับจะกลับกันกับกระบวนการส่งแต่สายอากาศส่งและรับสามารถสลับเปลี่ยนกันได้ ยกเว้นเรื่องขนาดในการรองรับกำลังงานแล้ว สายอากาศทั้งสองชนิดนี้จะเทียบเท่ากัน ในคุณสมบัติทุกประการเช่น อิมพีแดนซ์ และแพทเทิร์น (Pattern) ซึ่งความสัมพันธ์นี้ สามารถพิสูจน์ได้ทางคณิตศาสตร์

2.1.2 คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การลดทอนและการดูดกลืน (Attenuation and Absorption) กฎกำลังสองผกผันแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของกำลังงานจะลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ อาจกล่าวได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกลดทอนลงเมื่อระยะทางไกลออกไป โดยการลดทอนจะเป็นสัดส่วน ตรงกับระยะทางยกกำลังสอง การลดทอนมีหน่วยวัดเป็น เดซิเบล (decibels) หรือ เนเปอร์ (nepers) โดย $1 \text{ nepers} = 8.686 \text{ dB}$ การลดทอนของความหนาแน่นกำลังกับความเข้มสนามจะมีค่าเท่ากันกำหนดให้ P_1 และ E_1 แทนความหนาแน่นของกำลังงานและความเข้มสนาม ตามลำดับที่ระยะทาง r_1 จากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและ r_2 เป็นระยะที่ห่างออกไปมีค่า P_2 และ E_2

การลดทอนของกำลังงานที่ระยะไกลเทียบกับที่ระยะใกล้เป็นเดซิเบลจะได้

$$\alpha_p = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log \frac{P_1 / 4\pi r_1^2}{P_1 / 4\pi r_2^2} = 10 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 = 20 \log \frac{r_2}{r_1} \quad (2.6.1)$$

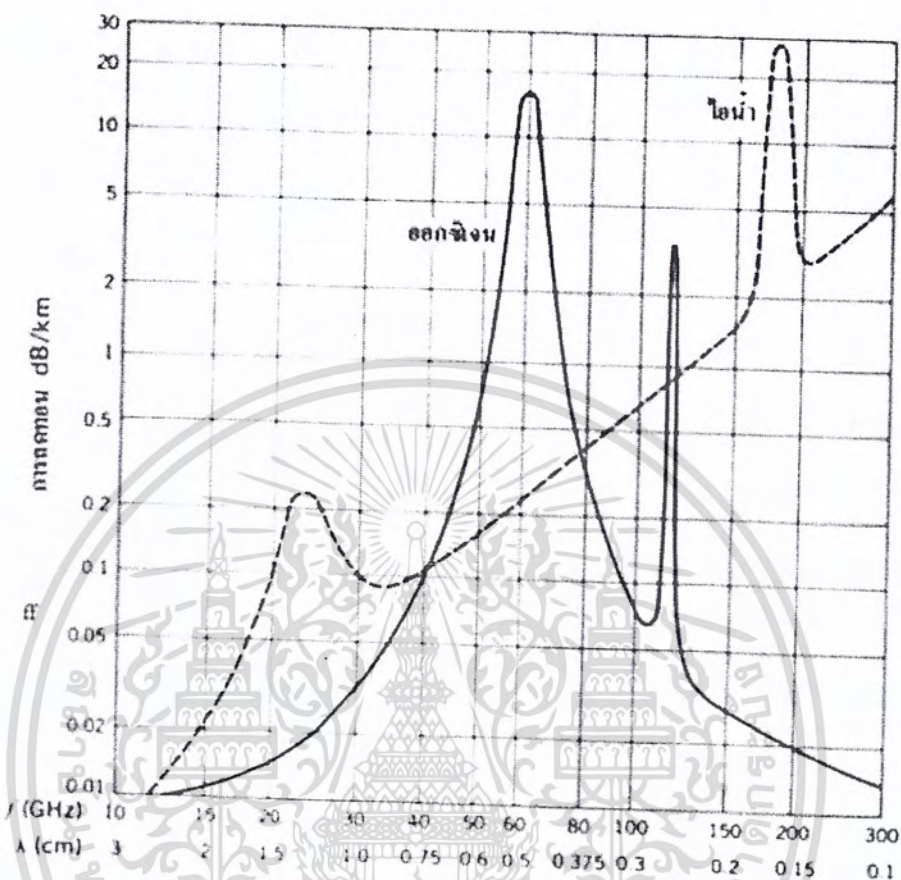
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกันกับการลดทอนของความเข้มสนามเราจะได้

$$\alpha_E = 20 \log \frac{\sqrt{30P_t / r_1}}{\sqrt{30P_t / r_2}} = 20 \log \frac{r_2}{r_1} \quad (2.6.2)$$

จะเห็นได้ว่าทั้งสองสูตรเหมือนกันและที่ระยะห่างออกไป $2r$ จากแหล่งกำเนิดของคลื่นทั้ง ความหนาแน่นกำลังและความเข้มสนามจะมีค่าลดลงเท่ากับ 6dB เทียบกับระยะห่างที่เท่ากับ r ใน อวกาศว่างจะไม่มีสิ่งใดดูดกลืนคลื่นวิทยุ แต่ ในชั้นบรรยากาศสัณฐานวิทยุจะถูกดูดกลืนบางคลื่น ทั้งนี้เพราะว่าพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกถ่ายโอนไปเป็นอะตอมและโมเลกุลของชั้นบรรยากาศ การถ่ายโอนนี้ จะทำให้อะตอมและโมเลกุลสั่นบ้างแต่ในขณะที่ชั้นบรรยากาศมีความอบอุ่นจะเกิดการดูดกลืนน้อยมาก และ โชคดี ที่ความถี่ต่ำกว่า 10GHz แทบไม่มีการดูดกลืนเลย ดัง แสดงให้เห็นในรูปที่ 3 การดูดกลืนที่เกิดจาก ออกซิเจนและไอน้ำ ในชั้นบรรยากาศจะเริ่มมากขึ้นที่ ความถี่สูงขึ้นไปบางความถี่จะถูกดูดกลืนสูงมาก เนื่องจากเกิดการรีโซแนนซ์ของโมเลกุลเช่นที่ ความถี่ 60GHz และ 120GHz จึงไม่แนะนำให้แพร่กระจายคลื่นทางไกลในชั้นบรรยากาศที่ความถี่นี้ นอกจากนี้ สำหรับการดูดกลืนจากออกซิเจนเราจะเรียกว่าเป็น ช่องหน้าต่างที่มีการดูดกลืนสูง ระหว่าง 33GHz ถึง 110GHz และเช่นเดียวกันการดูดกลืนของไอน้ำ ที่ความถี่ 23GHz กับ 180GHz ก็ ไม่เหมาะที่จะแพร่กระจายคลื่นยกเว้นในกรณีที่อากาศแห้งมาก

รูปที่ 2.3 แสดงการดูดกลืนในชั้นบรรยากาศแยกเป็นสองส่วน ในส่วนของการดูดกลืนที่เกิดจาก ไอน้ำเป็นค่าจากความชื้นมาตรฐาน แต่ถ้าความชื้นเพิ่มขึ้นเช่น เกิดมีหมอก มีฝนหรือหิมะ การดูดกลืนจะ เพิ่มขึ้นทันทีและการสะท้อนจากหยดน้ำ ฝนก็มีผลมากเช่น ระบบเรด้าความถี่ 10 GHz สามารถใช้ได้ดีที่ระยะ 75 กม. ในอากาศแห้ง ลดลงเหลือ 68 กม. เมื่อฝนตกปรอยๆ เหลือ ระยะ 55 กม. ในฝนตกบางๆ เหลือระยะ 22 กม. หากฝนตกพอประมาณ และเหลือระยะเพียง 8 กม. เมื่อฝนตกหนัก แสดงให้เห็นผลความรุนแรงของการดูดกลืนที่ความถี่ไมโครเวฟ แต่จะเกิดขึ้นน้อยมากที่ความถี่ต่ำ ยกเว้นที่ระยะทางการส่งไกลมากๆ



รูปที่ 2.3 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชั้นบรรยากาศ

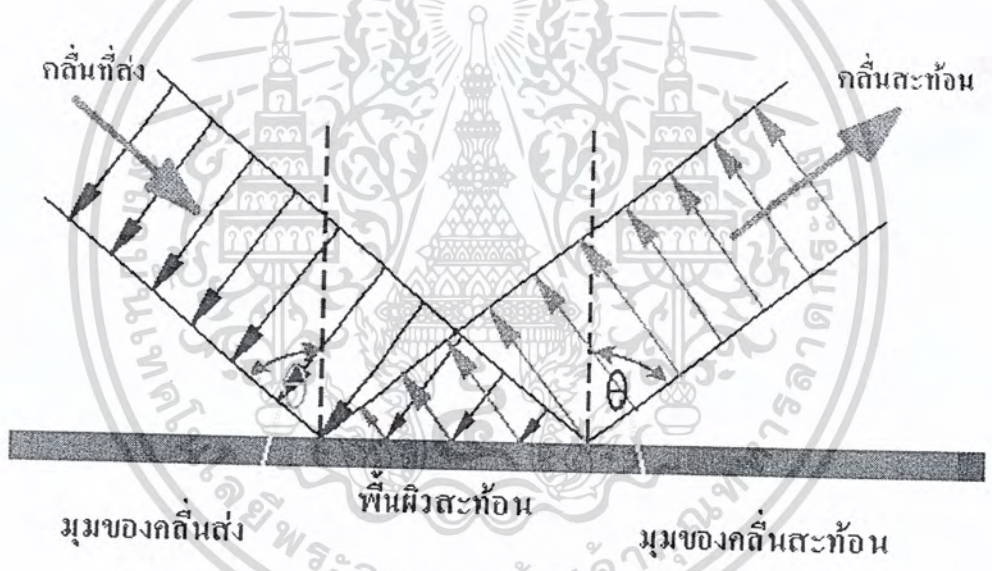
2.1.3 ผลจากสิ่งแวดล้อม

เมื่อการแพร่กระจายคลื่นเกิดขึ้นใกล้ๆ โลก จะมีปัจจัยอื่นที่ไม่มีในอวกาศว่าง เช่น การสะท้อน (Reflection) จากพื้นดิน ภูเขาและตึกหรือสิ่งก่อสร้าง คลื่นเกิดการหักเห (Refraction) เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันหรือการเกิดไอออนต่างองศา คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) อ้อมมวลวัตถุที่สูง คลื่นอาจเกิดการแทรกแซงรบกวน (Interference) ระหว่างกัน เมื่อสองคลื่นจากแหล่งกำเนิดเดียวกันมาพบกันหลังจากเดินทางมาจากทางต่างกัน คลื่นอาจจะถูกดูดกลืน โดยตัวกลางที่ต่างกัน ซึ่งปัจจัยต่างๆเหล่านี้เราจะพิจารณากันในรายละเอียดแต่ละหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.1 การสะท้อนของคลื่น

การสะท้อนของแสงจากกระจกเงากับการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จากตัวกลางที่เป็นตัวนำมีความเหมือนกันคือมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนดังแสดงใน รูปที่ 4 ในกรณีลำคลื่นตกกระทบ เส้นตั้งฉากและลำคลื่นสะท้อนเป็นระนาบเดียวกันแนวความคิดในการ ใช้แหล่งกำเนิดจินตภาพก็จะเกิดประโยชน์การพิสูจน์ความเท่ากันของมุมตกกระทบกับมุมสะท้อนและตามด้วยการพิสูจน์ที่เรียกว่ากฎที่สองของการสะท้อนของแสง จะต้องอยู่บนพื้นฐานความจริงที่ว่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นที่ตกกระทบกับคลื่นสะท้อนต้องเท่ากัน



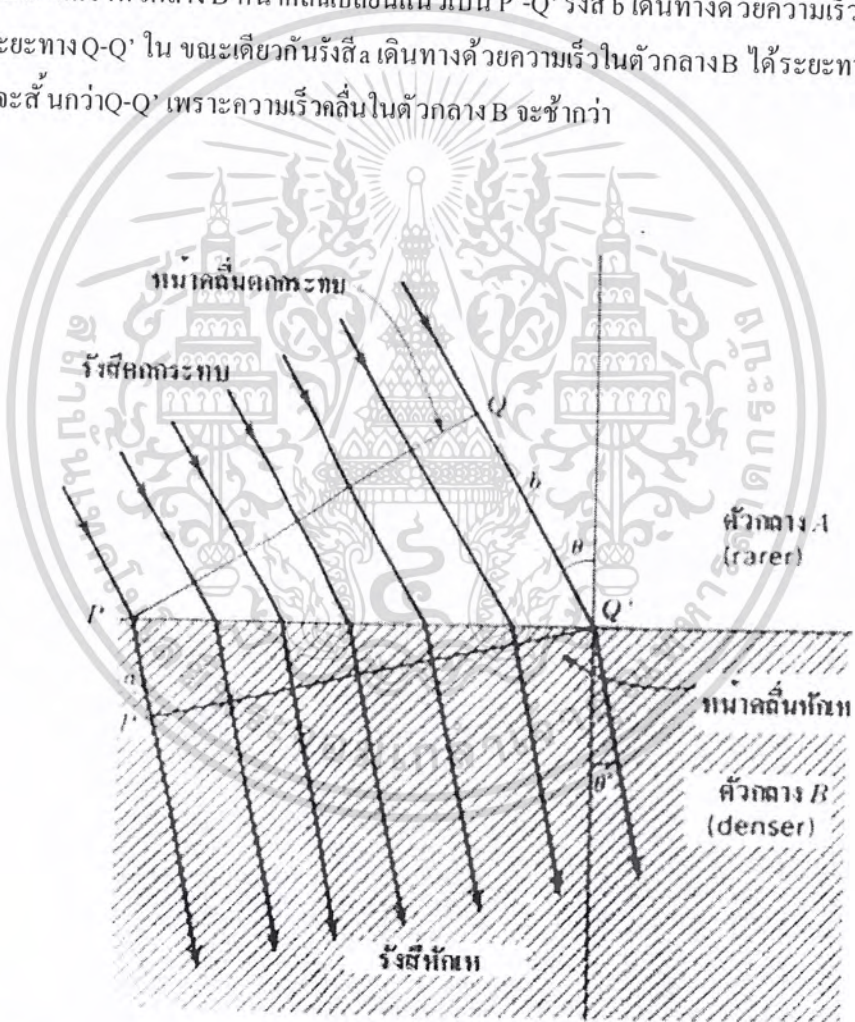
รูปที่ 2.4 การสะท้อนของคลื่น

การสะท้อนของคลื่นมีความคล้ายคลึงกันในการสะท้อนแสงด้วยกระจกถ้าเราเคยเข้าไปในร้านตัดผมที่มีกระจกทั้งด้านหน้าและด้านหลังจะเห็นภาพซ้อนกันจำนวนมากแต่ถ้าสังเกตให้ดีจะเห็นภาพ เหล่านั้นแต่ละภาพค่อยๆลดความสว่างลง ทั้งนี้เพราะเกิดการดูดกลืนในการสะท้อนแต่ละครั้ง ซึ่งจะเกิดขึ้น เช่นเดียวกับคลื่นวิทยุ จึงกำหนดสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน ρ เป็นอัตราส่วนความเข้มไฟฟ้าของคลื่น สะท้อนต่อคลื่นที่ตกกระทบ หากผิวตัวนำที่ทำให้เกิดการสะท้อนสมบูรณ์ก็จะมีค่าเท่ากับ 1 แต่โดยปกติจะ น้อยกว่า 1 ในทางปฏิบัติ อันเป็นผลให้เกิดการดูดกลืนพลังงานจากคลื่น โดยตัวนำที่ไม่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2 การหักเห

เช่นเดียวกับกับแสง การหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อคลื่นแพร่กระจายผ่านตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีความหนาแน่นแตกต่างกับความเร็วของคลื่นจะเปลี่ยนจึงทำให้หน้าคลื่นเปลี่ยนแนวในตัวกลางที่สอง พิจารณาจากรูปที่ 5 ตัวกลาง A มีความหนาแน่นน้อยกว่าตัวกลาง B เมื่อลำคลื่นผ่านตัวกลาง A ไปยังตัวกลาง B ด้วยมุมที่ไม่ใช่ 90 องศาตามหน้าคลื่น P-Q และเมื่อผ่านเข้าตัวกลาง B หน้าคลื่นเปลี่ยนแนวเป็น P'-Q' รังสี b เดินทางด้วยความเร็วในตัวกลางได้ระยะทาง Q-Q' ใน ขณะเดียวกันรังสี a เดินทางด้วยความเร็วในตัวกลาง B ได้ระยะทาง P-P' โดย P-P' จะสั้นกว่า Q-Q' เพราะความเร็วคลื่นในตัวกลาง B จะช้ากว่า



รูปที่ 2.5 การหักเหของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของมุมตกกระทบ θ กับมุมหักเห θ' สามารถคำนวณโดยอาศัยตรีโกณมิติ และเรขาคณิต ง่ายๆ ให้พิจารณาจากสามเหลี่ยมมุมฉาก PQQ' และ $PP'Q'$ เราได้ว่า

$$Q\hat{P}Q' = \theta \text{ และ } P\hat{Q}'P' = \theta' \tag{2.7}$$

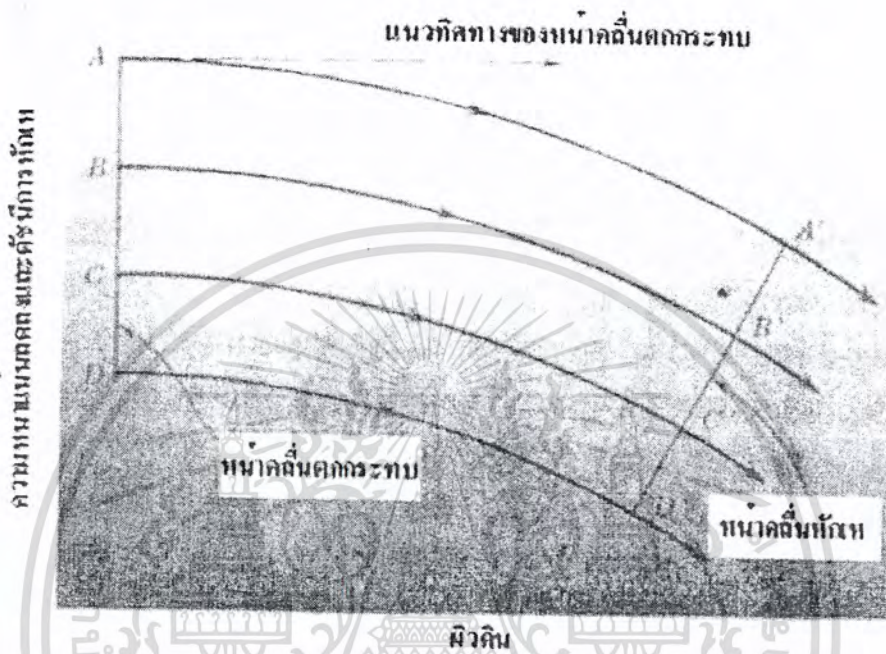
และ
$$\frac{\sin \theta'}{\sin \theta} = \frac{PP'/PQ'}{QQ'/PQ'} \frac{PQ'}{QQ'} = \frac{v_B}{v_A} \tag{2.8}$$

ในเมื่อ $v_A = \text{ความเร็วของคลื่นในตัวกลาง A} = \frac{v_c}{\sqrt{k}}$
 $v_B = \text{ความเร็วของคลื่นในตัวกลาง B} = \frac{v_c}{\sqrt{k'}}$

$$\frac{\sin \theta'}{\sin \theta} = \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{k'}} = \frac{1}{\mu} \tag{2.9}$$

ในเมื่อ $k = \text{ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในตัวกลาง A}$
 $k' = \text{ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในตัวกลาง B}$
 $\mu = \text{ดัชนีการหักเห}$

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 1 และในอากาศมีค่าใกล้เคียง 1 หากรอยต่อระหว่าง ตัวกลางมีความหนาแน่นแตกต่างกันทันที ลำคลื่นก็จะหักเหดังใน รูปที่ 2.5 แต่ถ้าความหนาแน่นระหว่าง รอยต่อค่อยๆเปลี่ยนแปลงและเป็นเชิงเส้น การหักเหของคลื่นจะเป็นเส้นโค้งดังแสดงใน รูปที่ 2.6 และในชั้นบรรยากาศเหนือโลก ความหนาแน่นจะค่อยๆเปลี่ยนแปลงไปอย่างเชิงเส้นกับความสูง โดยความหนาแน่น ด้านบนจะบางกว่าด้านล่าง และคลื่นส่วนบนจึงเดินทางเร็วกว่าส่วนล่าง ทำให้การหักเหของลำคลื่น โค้งลงแทนที่จะพุ่งเป็นเส้นตรง ด้วยเหตุนี้ขอบเขตการส่งวิทยุจึงเพิ่มขึ้นทางแนวนอน

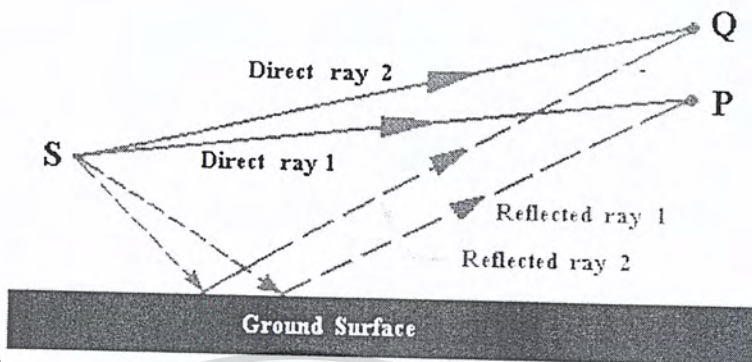


รูปที่ 2.6 การหักเหของคลื่นในตัวกลางที่ความหนาแน่นค่อยๆลดลงอย่างเชิงเส้น

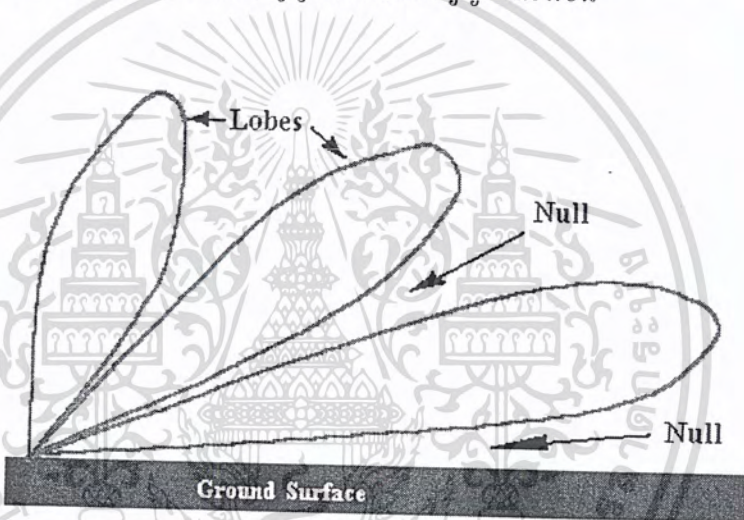
2.1.3.3 การแทรกแซงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การแทรกแซงหรือการรบกวนจะเกิดขึ้นเมื่อสองคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกันแต่เดินทางไปในทิศทางจนถึงจุดหมาย ซึ่งมักเกิดขึ้นบ่อยในย่านความถี่สูงที่แพร่กระจายคลื่นแบบคลื่นฟ้า (Sky-wave) และย่านความถี่ไมโครเวฟที่แพร่กระจายคลื่นแบบคลื่นอวกาศ (Space wave) แต่ในที่นี้เราจะมาพิจารณากันเฉพาะกรณีหลังจากรูปที่ 2.7 สายอากาศไมโครเวฟที่ P และ Q ติดตั้งใกล้พื้นดินที่ความสูงต่างกัน รับสัญญาณที่ส่งมาจากจุด S สัญญาณที่มาถึงสายอากาศไม่เฉพาะสัญญาณตรงอย่างเดียวแต่จะมีสัญญาณที่สะท้อนมาจากพื้นดินด้วยสัญญาณตรงจะมีระยะทางสั้นกว่า ระยะทางของสัญญาณสะท้อนมาอยู่ที่สายอากาศ P หากเส้นทาง 1 กับเส้นทาง 1' ต่างกันเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น สัญญาณทั้งสองจะเกิดหักล้างกันหมดที่จุด P หากว่าสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นดินสะท้อนอย่างสมบูรณ์ ทำนองคล้ายกันที่สายอากาศ Q หากเส้นทาง 2 และ 2' ต่างกันเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น สัญญาณที่ Q จะเสริมกันซึ่งมากหรือน้อยก็ขึ้นกับการสะท้อนจากพื้นดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



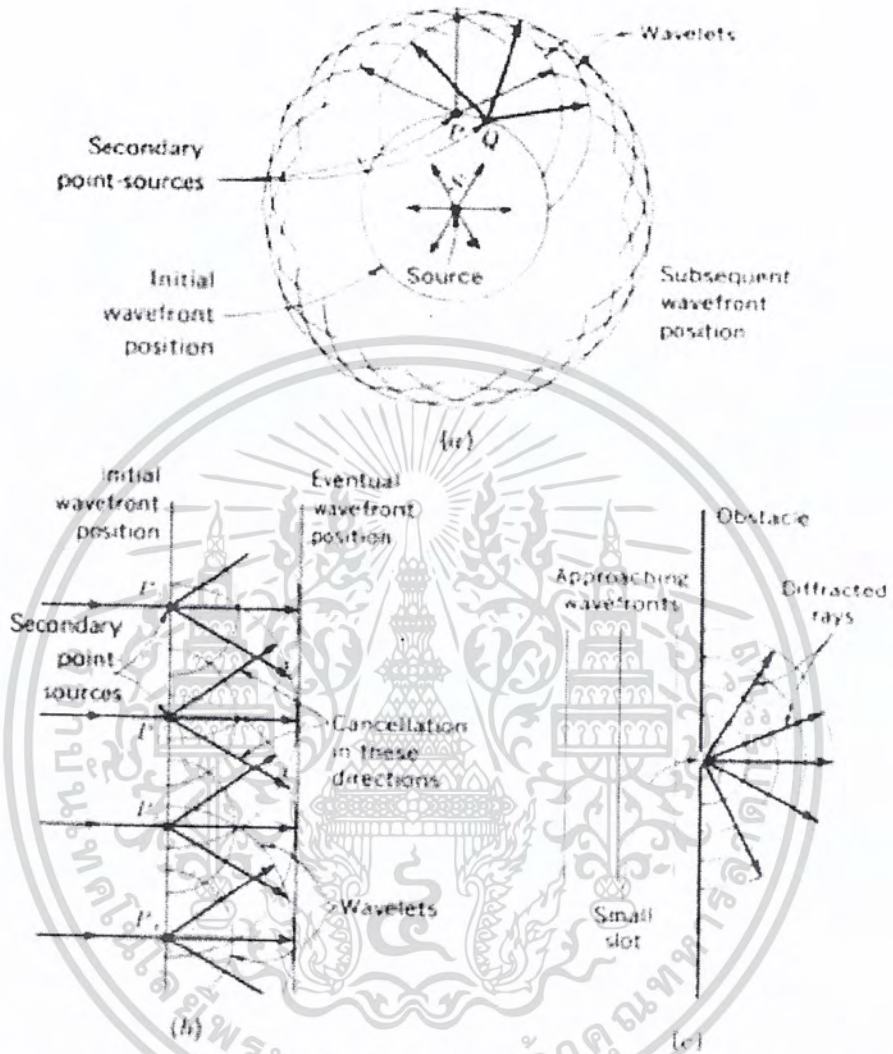
รูปที่ 2.7 การแทรกแซงของสัญญาณตรงกับสัญญาณสะท้อน



รูปที่ 2.8 รูปแบบการแผ่พลังงาน(Radiation Pattern) จากการแทรกแซง

ความต่างกันที่ระยะใกล้กันจากข้างบนและข้างล่างจึงเกิดขึ้น ลักษณะแบบรูปจากประกอบด้วยการสลับของการหักล้างและการเสริมกันของสัญญาณ สามารถวัดความเข้มสนาม (Field-strength) จริงและนำมาคำนวณหรือพล็อตดังรูปที่ 2.8 ตรงที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็น ศูนย์ (Null) หรือบอดเกิดจากสัญญาณหักล้างกันเช่นที่จุด P และตรงที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็น พู(Lobes) เกิดจากสัญญาณเสริมกันเช่นที่จุด Q ดังนั้นในกรณีนี้การเพิ่มกำลังส่งของเครื่องให้แรงขึ้นจึงไม่ได้ทำให้เครื่องรับสามารถรับสัญญาณได้ทุกๆตำแหน่งเพียงแต่เลื่อนตำแหน่งหรือปรับมุม การรับของ สายอากาศให้ถูกต้องก็สามารถรับได้ดีแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

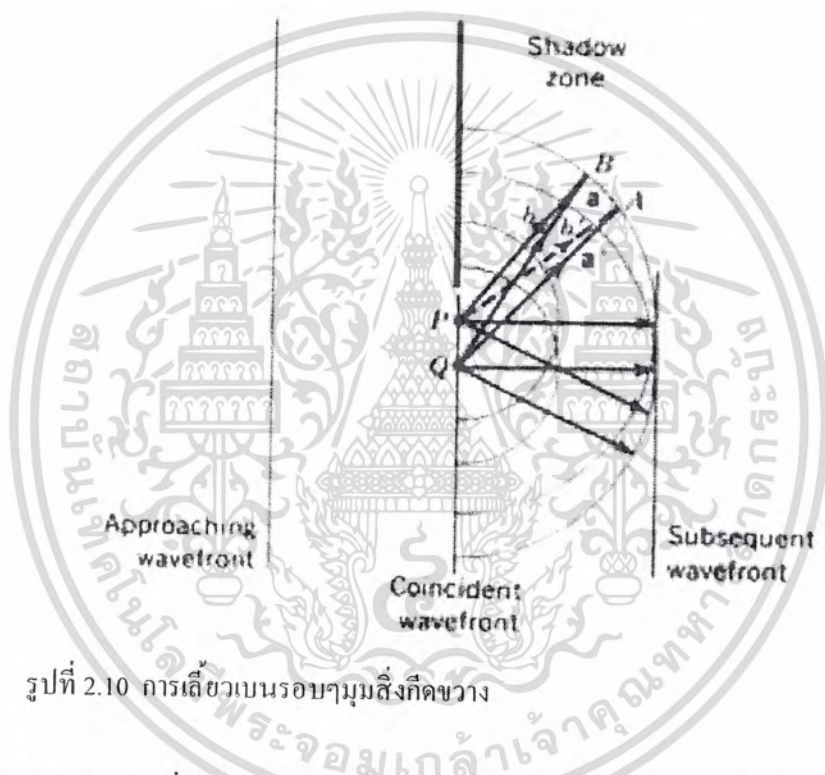


รูปที่ 2.9 การเลี้ยวเบน(Diffraction) (a) เกิดจากหน้าคลื่นทรงกลม (b) จากหน้าคลื่นแนวระนาบ (c) เกิดจากช่องเล็กๆ

2.1.3.4 การเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุ(Diffraction of Radio Wave)

การเลี้ยวเบนของคลื่นเป็นคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มักเกิดขึ้นกับรูเล็กๆบนระนาบตัวนำหรือมุมที่คมของสิ่งขีดขวางวิถี คลื่น ซึ่ง Huygens เป็นผู้ค้นพบตั้งแต่ศตวรรษที่ 17 โดย Huygens กล่าวว่าทุกๆจุดของหน้าคลื่นทรงกลม จะเป็นแหล่งกำเนิดทุติยภูมิที่แพร่คลื่นไกลออกไปดังในรูปที่ 2.9a สนามรวมทั้งหมดที่พุ่งออกจาก แหล่งกำเนิดจะเท่ากับผลรวมทางเวกเตอร์ของจุดกำเนิดทุติยภูมิเหล่านี้ ในกรณีหน้าคลื่นแนวระนาบให้พิจารณาจากรูปที่ 2.9b การ

เกิดแหล่งกำเนิดทุติยภูมิก็มีเช่นเดียวกันแต่ทำไมหน้าคลื่นยังคงเป็นแนวระนาบแทนที่จะแผ่ออก เหตุผลก็คือหากไม่จำกัดระนาบคลื่นจะเกิดการหักล้างกันของคลื่นในทิศทางอื่นๆทั้งหมดยังคงเหลือเฉพาะคลื่นในทิศทางเดิมอย่างไรก็ตามถ้าระนาบคลื่นจำกัดการหักล้างจะไม่หมดผลทีเดียวจึงอาจมีการลู่ออกหรือกระจายกระจายบ้างเพียงแต่หน้าคลื่นมีขนาดเล็กแต่ถ้าในกรณีช่องเล็กๆของ แนวซิด ขวางดังรูปที่ 2.9c คลื่นจะกระจายออกและแพร่ออกไปทุกทิศทาง



รูปที่ 2.10 การเลี้ยวเบนรอบขามุมสิ่งกีดขวาง

สำหรับกรณีสิ่งกีดขวางดังรูปที่ 2.10 เมื่อหน้าคลื่นเจอมุมของสิ่งกีดขวางจะเกิดการเลี้ยวเบน เช่น ที่จุด P และ Q ใกล้เคียงมุมสิ่งกีดขวางคลื่นจะเบนออกทำให้ด้านหลังของสิ่งกีดขวางได้รับคลื่น ซึ่งปกติถ้าไม่มีสิ่งกีดขวาง เวกเตอร์หน้าคลื่นอื่นจะหักล้างกันเหลือแต่หน้าคลื่นเดิมการเลี้ยวเบนของคลื่นมีประโยชน์ในทางปฏิบัติที่เห็นชัด 2 อย่างคือ หนึ่งทำให้เครื่องรับซึ่งอยู่หลังสิ่งกีดขวาง เช่น ภูเขา หรือ ตึกสูงสามารถรับคลื่น อากาศ (Space Wave) ได้ และสองใช้หลักการเลี้ยวเบนของคลื่นในการออกแบบเสาอากาศไมโครเวฟเพื่อลดหูข้าง (Side Lobes) ที่ไม่ต้องการ

2.2 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น จะมีการแพร่ออกไปในทุกทิศทาง คลื่นวิทยุเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเดินทางไปได้ด้วยความเร็วเท่าแสงอย่างไรก็ดี คลื่นวิทยุที่มีความถี่ไม่เท่ากันก็มีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นไม่เท่ากันในพื้นที่ที่ไกลออกไปจากสถานีส่ง คลื่นวิทยุที่มีความถี่ลดลง สัญญาณจึงอ่อนลงๆ ดังในรูปที่ 2.11 ฉะนั้นเครื่องรับที่อยู่ใกล้เครื่องส่งมากกว่าย่อมรับ สัญญาณได้แรงและคุณภาพของสัญญาณดีกว่าเครื่องรับที่อยู่ห่างออกไปจากเครื่องส่ง



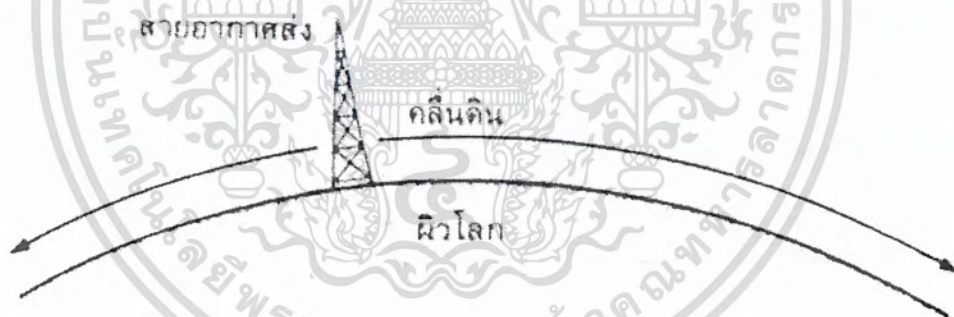
รูปที่ 2.11 เครื่องรับที่อยู่ใกล้สถานีส่งจะรับสัญญาณได้แรงกว่าเครื่องรับที่อยู่ไกลออกไปจากสถานีส่ง

เรานิยมแบ่งชนิดของคลื่นตามลักษณะการเดินทาง เช่น คลื่นดิน คลื่นอากาศ คลื่นฟ้า การเดินทางของ คลื่นเหล่านี้แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง การใช้ประโยชน์คลื่นวิทยุเหล่านี้ จึงต้องเลือกความถี่และการเดินทาง ของคลื่นให้เหมาะสม เพื่อให้คลื่นวิทยุสามารถเดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ โดยมีการลดทอนน้อย ที่สุด รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นวิทยุจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ

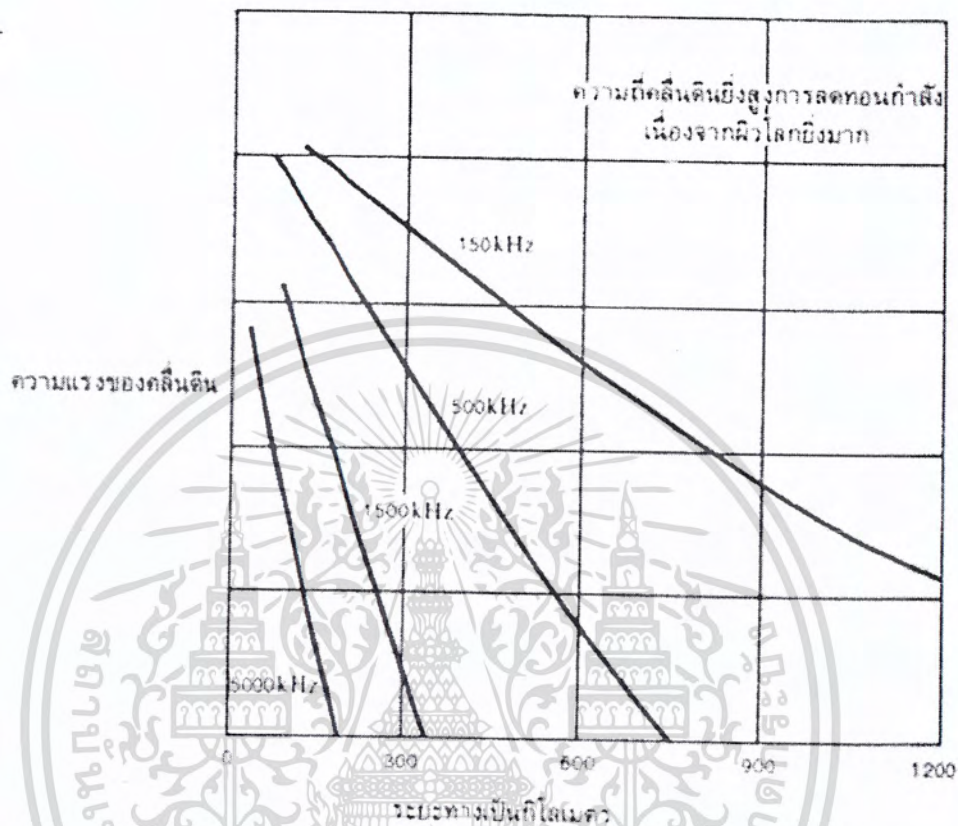
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 คลื่นดิน (ground wave)

คลื่นดินเป็นคลื่นวิทยุที่เดินทางไปบนผิวโลก บางครั้งเรียกว่าคลื่นผิว (surface wave) เราสามารถใช้คลื่นดินติดต่อสื่อสารกันได้ในช่วงความถี่และ ปกติคลื่นดินที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า จะเดินทางไปได้ ไกลกว่าและจะเดินทางไปไกลกว่าขอบฟ้า ดังรูปที่ 13 สำหรับคลื่นดินที่มีความถี่ สูงขึ้นจะเดินทางไปไม่ไกลเพราะถูกดูดทอนมาก เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศหรือสิ่งกีดขวาง (ดูรูปที่ 14) เหตุผลก็คือเมื่อความถี่ สูงขึ้นความยาวคลื่นจะสั้นลงวัตถุที่ใหญ่ เช่นภูเขาจึงมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่น ยกตัวอย่าง เช่น ที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ความยาวคลื่นจะเท่ากับ 10000 เมตร หรือ 6.2 ไมล์ เมื่อเทียบกับขนาดของภูเขา แล้วภูเขายังมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น ฉะนั้นการดูดทอนคลื่นดินที่ความถี่นี้ จะมีน้อยแต่ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ ความยาวคลื่นจะเป็น 100 เมตร วัตถุที่ใหญ่กว่าความยาวคลื่น เช่น ต้นไม้เนินเขา ตึกกราม บ้านช่องจะเริ่มมีผลในการดูดทอนคลื่นดิน



รูปที่ 2.12 การเดินทางของคลื่นดิน

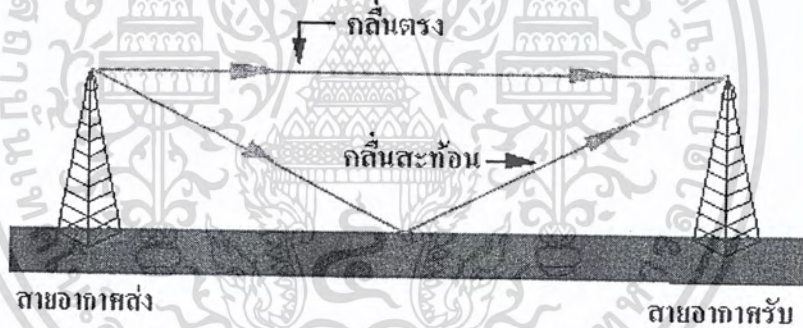


รูปที่ 2.13 การลดทอนของคลื่นดินที่ความถี่ต่างๆ

วิธีการที่จะให้คลื่นดินแพร่ไปได้ไกลมากขึ้นทำได้โดยการแพร่กระจายคลื่นให้มีโพลาไรเซชันแนวตั้งในกรณีที่เราแพร่กระจายคลื่นให้มีโพลาไรเซชันแนวราบสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นขนานกับผิวโลก ฉะนั้น คลื่นดินจะเสมือนถูกฉลัดวงจร(ดูดกลืน) ด้วยความนำไฟฟ้า(conductivity) ของผิวโลก อย่างไรก็ตามเราใช้ประโยชน์คลื่นดินได้เฉพาะย่านความถี่ LF กับ MF เท่านั้น ลองจินตนาการว่า ด้วยเหตุนี้สายอากาศที่มีความยาวในย่าน ความถี่นี้ จะสร้างได้ยากมากเพราะมีขนาดใหญ่โตมโหฬาร ฉะนั้นเราจึงไม่ค่อยนิยมสื่อสารกันในย่าน ความถี่ LF แต่สำหรับย่านความถี่ MF เราสามารถติดต่อสื่อสาร โดยคลื่นดินได้เพราะขนาดสายอากาศใน ย่านความถี่นี้ มีขนาดใหญ่พอสมควร

2.2.2 คลื่นอากาศ

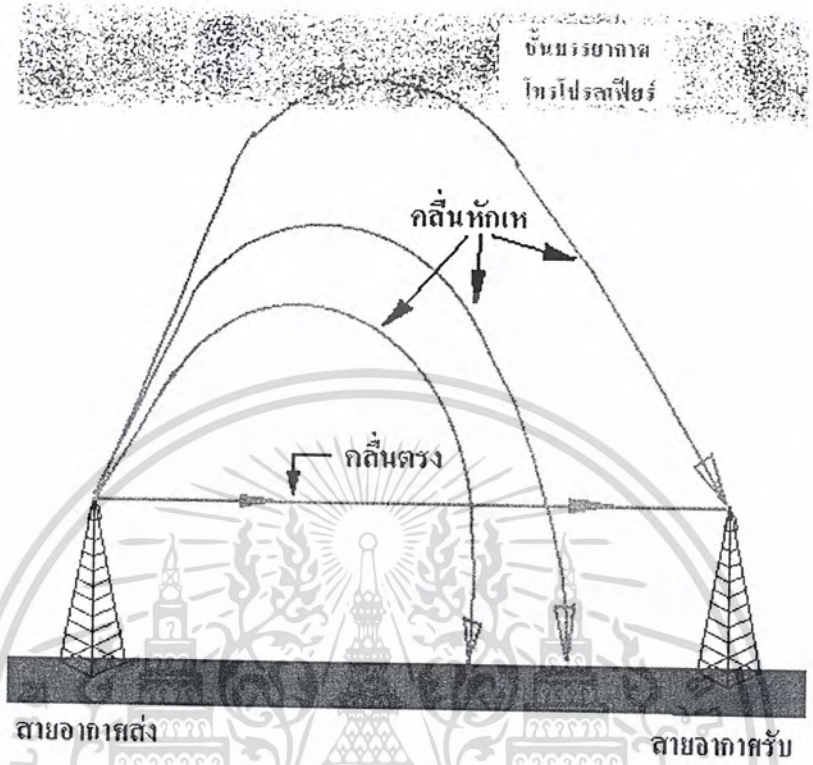
เมื่อความถี่ของคลื่นวิทยุสูงกว่า 4.5 เมกะเฮิร์ตซ์ คลื่นดินเริ่มจะไปได้เพียงไม่กี่กิโลเมตร และเมื่อ ความถี่สูงขึ้นไปในย่าน VHF และ UHF คลื่นอากาศจะไปได้ไกลกว่าคลื่นดิน การติดต่อสื่อสารในย่าน ความถี่นี้ สายอากาศจะต้องอยู่ในระยะสายตา เพราะคลื่นอากาศเดินทางโดยตรงจากสายอากาศเครื่อง ส่งไปยังเครื่องรับบางครั้งจึงเรียกว่าคลื่น โดยตรง (direct wave) จากรูปที่ 15 คลื่นอากาศจะถูกจำกัดให้มีรัศมีการติดต่ออยู่ไม่เกินระยะสายตานั้น ถ้าเราต้องการขยายการติดต่อสื่อสารให้ไกลขึ้น วิธีง่ายๆ ก็คือ ต้องเพิ่มความสูงของสายอากาศ การติดต่อโดยคลื่นอากาศอีกแบบหนึ่งได้แก่การติดต่อผ่านดาวเทียมหรือ เครื่องบิน วิธีนี้ทำให้ความสูงสายอากาศต้องเพิ่มขึ้นมากมายรัศมีการติดต่อก็จะไปได้ไกลขึ้น ในย่านความถี่ VHF และ UHF หรือความถี่ที่สูงกว่านี้ เรานิยมสื่อสารกัน โดยใช้คลื่นอากาศ



รูปที่ 2.14 การเดินทางของคลื่นอากาศ

2.2.3 คลื่นฟ้า (sky wave)

เหนือผิวโลกขึ้นไปประมาณ 50 ถึง 400 กิโลเมตร การแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์จะทำให้อนุภาคของก๊าซในชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกแตกตัวเป็นไอออน (ionize) เกิดประจุบวกและประจุลบ รวมทั้งอิเล็กตรอนอิสระมากมาย ชั้นบรรยากาศที่โดนรังสีแล้วเกิด ไอออนนี้เรียกว่าชั้น ไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางเข้าสู่ชั้นบรรยากาศนี้จะถูกหักเหเนื่องจากสนามไฟฟ้าใน

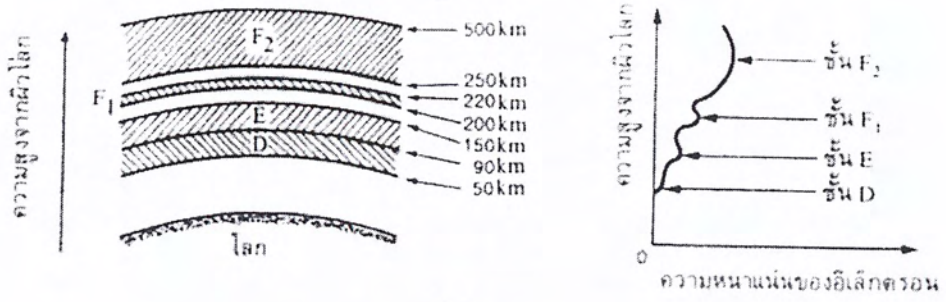


รูปที่ 2.15 การเดินทางของคลื่นไฟฟ้า

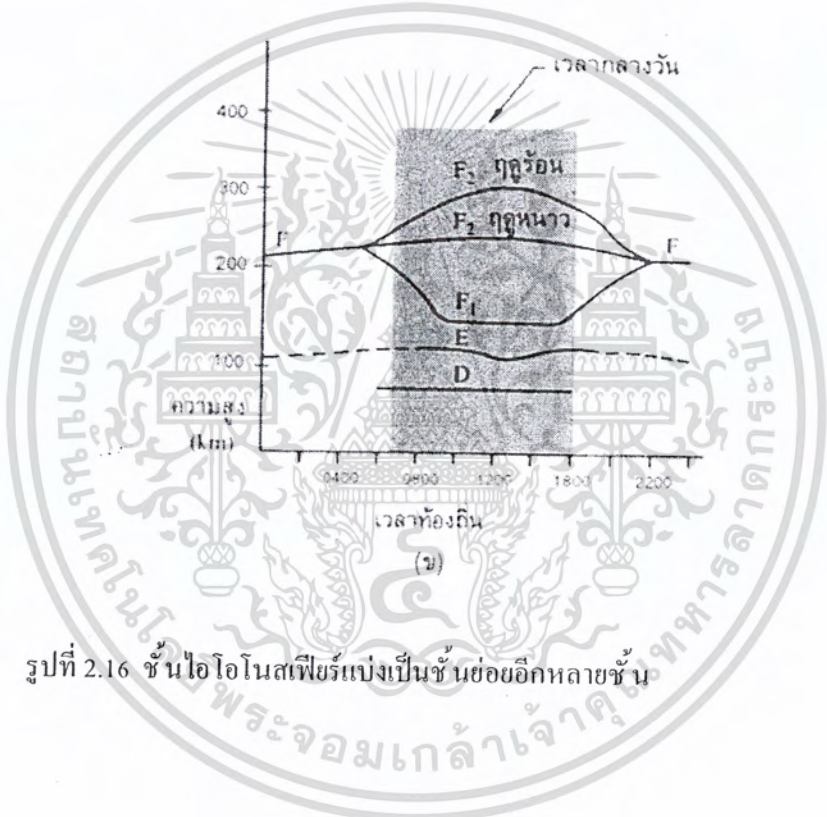
2.2.4 ชั้นไอโอโนสเฟียร์

ชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชั้น น้อยตามปริมาณไอออนที่เกิดขึ้น คลื่นไฟฟ้าที่สะท้อนกลับจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นี้ อาจมาจากชั้นน้อยๆ ที่ความสูงต่างกัน และนอกจากนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับความถี่ในช่วงเวลาเช้ากลางวันเย็น หรือกลางคืน ปริมาณไอออนที่เกิดขึ้นไอโอโนสเฟียร์นี้ จะไม่กันเพราะก๊าซต่างๆ ที่ห่อหุ้มโลกมีอยู่หลายชนิดที่มีความดันต่าง ๆ กัน ทำให้รับอิทธิพลจากรังสีคอสมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.16 ชั้นไอโอโนสเฟียร์แบ่งเป็นชั้นย่อยอีกหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



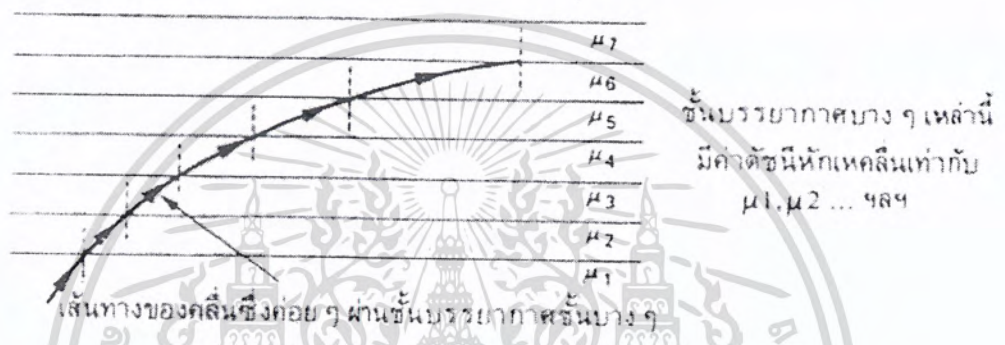
รูปที่ 2.17 ชั้นบรรยากาศรอบโลก

ชั้นย่อยในไอโอโนสเฟียร์ยังแบ่งออกเป็นหลายชั้นย่อยที่ความสูงต่างกัน ดังรูปที่ 17 สังเกตว่าชั้น D จะเกิดขึ้นเฉพาะเวลากลางวัน ชั้นนี้อยู่ไกลจากดวงอาทิตย์ประมาณ ไอออนจะมีน้อยมากชั้น D จึงไม่ค่อยหักเหคลื่นวิทยุ แต่จะมีการดูดกลืนคลื่นให้คลื่นย่อยลงไปบ้าง ฉะนั้นในการสื่อสารผ่านชั้นคลื่นจะถูกลดทอนทั้งข้างขึ้นและข้างลงสำหรับคลื่นในย่านความถี่ MF ชั้น D จะถูกดูดกลืนจนหมดสิ้น ฉะนั้นคลื่นในย่านความถี่ จะสื่อสารได้เฉพาะคลื่นดินในตอนกลางวัน แต่ในตอนกลางคืนชั้น D จะหายไป คลื่น (ในย่าน MF) ก็จะสามารถเดินทางได้ทั้งทางคลื่นดินและคลื่นฟ้าด้วยชั้น E อยู่ในช่วงความสูงตั้งแต่ 90 ถึง 130 กิโลเมตรเหนือผิวโลก ชั้นนี้จะมีปริมาณไอออนหนาแน่นที่สุดในตอนเที่ยงวัน และมีน้อยมากในตอนกลางคืน (ดูรูปที่ 18 ประกอบ) ส่วนชั้น F ก่อนข้างเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เพราะเป็นชั้นที่อยู่บนสุดและใกล้ดวงอาทิตย์กว่าชั้นอื่นๆ ในตอนกลางคืนชั้นนี้จะมีชั้นเดียวอยู่ระหว่างความสูงประมาณ 180 ถึง 400 กิโลเมตร แต่ในตอนกลางวันรังสีจากดวงอาทิตย์จะแผ่มาแรงมากจึงแบ่งออกเป็นชั้นย่อยอีกคือชั้น " F1 กับ F2 ชั้น F1 อยู่ระหว่าง 130 ถึง 250 กิโลเมตร ส่วนชั้น F2 อยู่ระหว่าง 140 ถึง 300 กิโลเมตรในฤดูหนาว และจะสูงขึ้นไปอีกระหว่าง 250 ถึง 350 กิโลเมตรในฤดูร้อน

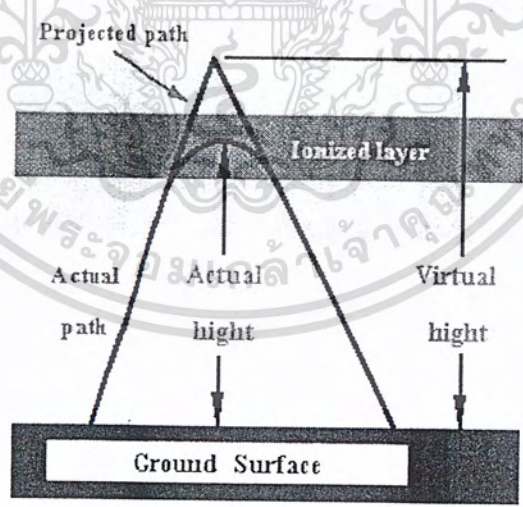
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การสื่อสารทางคลื่นฟ้า

การสื่อสารทางคลื่นฟ้านี้ ค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จากรูปที่ 2.18 จะเห็นว่าคลื่นฟ้าค่อยๆ หักเหกลับมาจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ทีละน้อย มิใช่เป็นการหัก



รูปที่ 2.18 คลื่นวิทยุค่อยๆ ผ่านชั้นบรรยากาศชั้นบาง ๆ



รูปที่ 2.19 ระยะสูงเสมือนของชั้นไอโอโนสเฟียร์

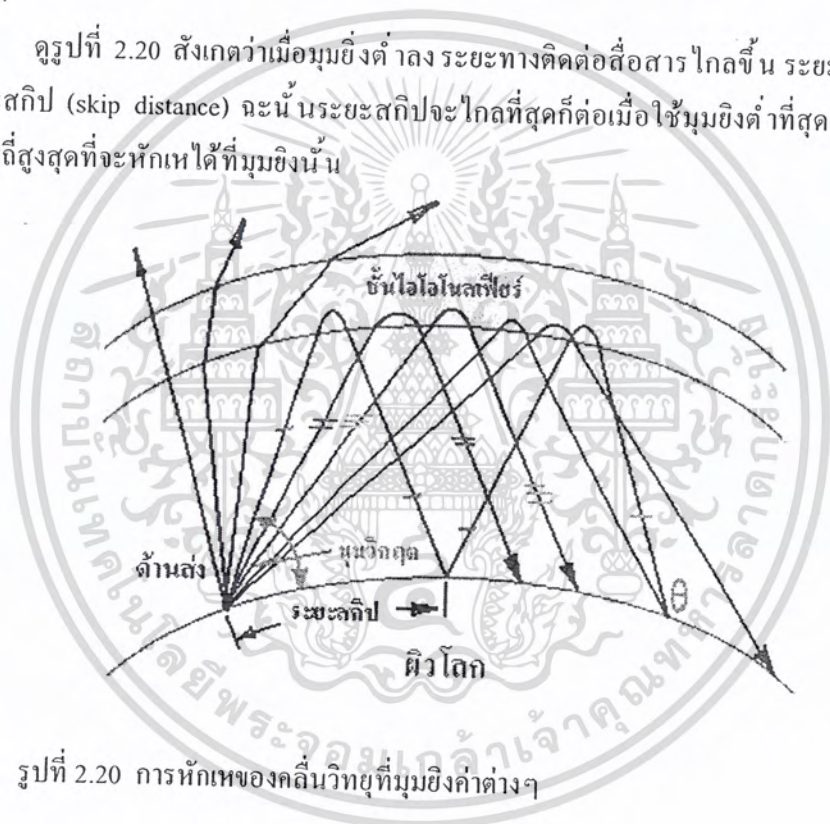
มายังโลกเมื่อความถี่ของคลื่นสูงขึ้นไปเกินค่าหนึ่งคลื่นจะไม่สะท้อนกลับมาความถี่นี้เรียกว่าความถี่วิกฤต (Critical frequency) ฉะนั้นเมื่อส่งคลื่นที่มีความถี่สูงกว่าความถี่วิกฤตขึ้นไปในแนว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นก็จะไม่ สะท้อนกลับมายัง โลกความถี่วิกฤตนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชั้นไอโอ โนสเฟียร์ซึ่งไม่แน่นอน -

สมมุติว่า เรายังคลื่นขึ้นไปเป็นมุมเฉียง(แทนที่จะเป็นแนวตั้ง) คลื่นก็จะเดินทางในชั้น ไอโอ โนสเฟียร์นานขึ้น ดังนั้นการหักเหจะหักเหได้มากขึ้น ซึ่งหมายความว่าความถี่ที่สูงกว่าความถี่ วิกฤต จะสะท้อนกลับสู่โลกได้ถ้ายังคลื่นเป็นมุมเฉียงอย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดอื่นอีก กล่าวคือ ถ้ามุมยิงสูงขึ้นจนถึงมุมยิงค่าหนึ่งแล้ว คลื่นจะทะลุฟ้าไปเลย ไม่สะท้อนกลับมามุมนี้ เรียกว่ามุม วิกฤต

ดูรูปที่ 2.20 สังเกตว่าเมื่อมุมยิงต่ำลง ระยะทางติดต่อสื่อสารไกลขึ้น ระยะทางนี้เรียกว่า ระยะสกลิป (skip distance) ฉะนั้น ระยะสกลิปจะไกลที่สุดก็ต่อเมื่อใช้มุมยิงต่ำที่สุดและใช้คลื่นที่มีความถี่สูงสุดที่จะหักเหได้ที่มุมยิงนั้น



รูปที่ 2.20 การหักเหของคลื่นวิทยุที่มุมยิงค่าต่างๆ

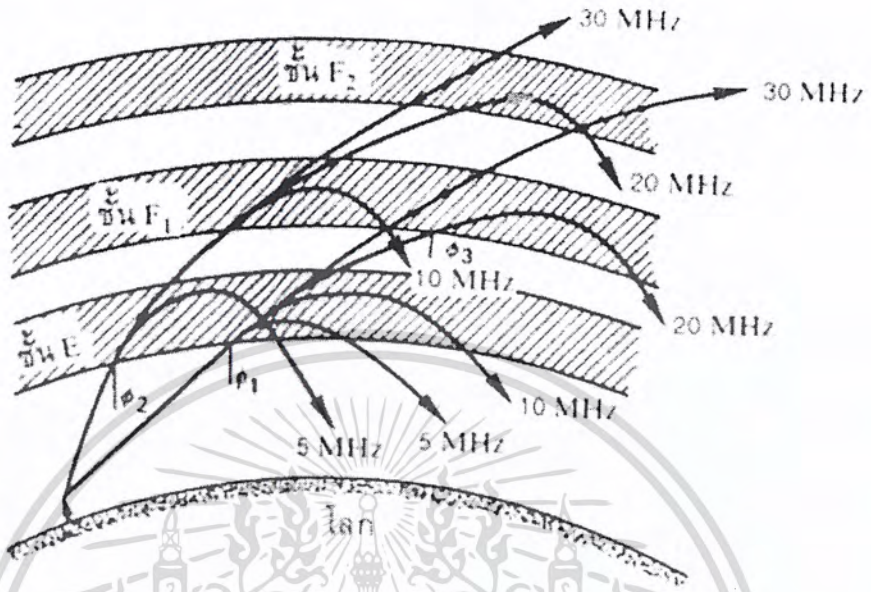
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 ความถี่ใช้งานสูงสุดในที่นี้เท่ากับ 20 MHz ที่มุมยิงที่กำหนดให้เพื่อให้หักเหลงมายังจุด A

ความถี่สูงสุดที่สามารถใช้ติดต่อได้ระหว่างจุด 2 จุด เรียกว่า ความถี่ใช้งานสูงสุด (maximum usable frequency หรือ MUF) ความจริงความถี่ต่ำกว่า MUF ก็ใช้ได้เพราะคลื่นสามารถหักเหลงมาได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อความถี่ต่ำลงอัตราการลดทอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์จะเพิ่มขึ้นมากมายระดับสัญญาณที่รับได้จะอ่อนลง ความถี่ต่ำสุดที่ใช้ติดต่อกันได้นี้เรียกว่าความถี่ใช้งานต่ำสุด (lowest usable frequency หรือ LUF) นั่นคือ ถ้าใช้ความถี่ต่ำกว่า LUF จะรับคลื่นไม่ได้ เพราะถูกลดทอนหมด ถ้าใช้ความถี่สูงกว่า MUF ก็จะไม่ได้รับได้เพราะคลื่นทะลุฟ้าไม่สะท้อนกลับ ฉะนั้นที่ความถี่ MUF เราจะได้รับสัญญาณแรงที่สุด ดังในรูป ที่ 2.22 โดยปกติค่า MUF จะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ เนื่องจากรังสีจากดวงอาทิตย์ ดังนั้นเราจึงเลือกความถี่ใช้งานที่เหมาะสม (optimum usable frequency) คือให้ต่ำกว่าค่า MUF ลงมามากพอที่จะให้

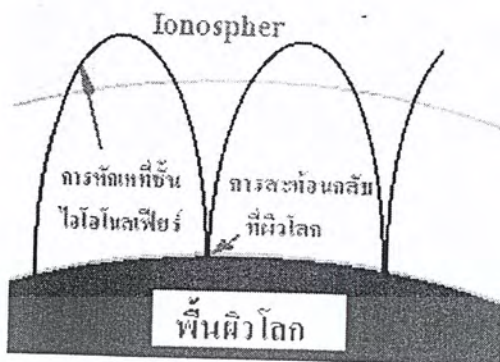
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 การหักเหของคลื่นที่ความถี่ต่างๆ สำหรับชั้นไอโอโนสเฟียร์ชั้นย่อย

2.2.6 การสื่อสารหลายฮอป

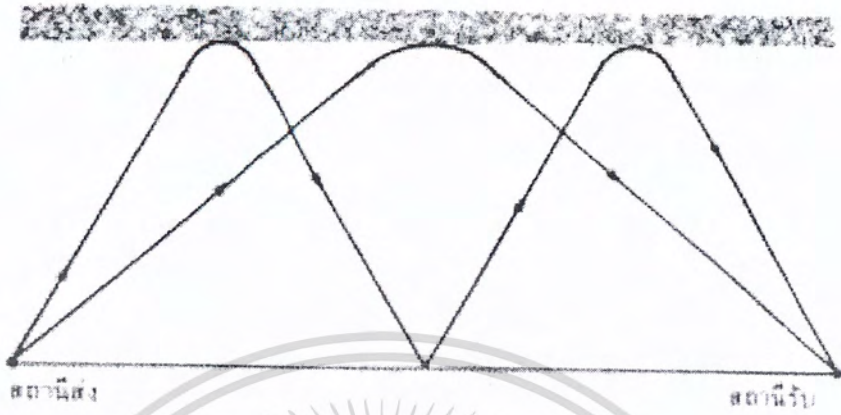
คลื่นที่เราส่งขึ้นไปบนฟ้าเมื่อหักเหกลับลงมายังโลกหากคลื่นแรงพอก็อาจจะสะท้อนผิวโลกกลับขึ้นไปบนฟ้าแล้วหักเหกลับลงมายังโลกได้อีกดังในรูปที่ 2.23 จากเครื่องส่งจะยิงคลื่นขึ้นไปสะท้อนกลับมาที่จุด A แล้วยังมีความแรงพอจึงสะท้อนขึ้นไปบนฟ้าอีกและกลับลงมาที่จุด B ได้การสื่อสารแบบนี้คลื่นจะ กระโจน (hop) หลายครั้ง จึงเรียกกันว่าเป็นการสื่อสารหลายฮอป (multihop) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมระยะทางที่สื่อสารกันได้แบบฮอปเดียว การสะท้อนของคลื่นจากชั้นบรรยากาศเพียงครั้งเดียวอาจจะไปได้ไกลถึง 2000 ถึง 3000 กิโลเมตร ขึ้นอยู่กับมุมยิงแต่มุมยิงจะต่ำกว่าขอบฟ้าไม่ได้ฉะนั้นการสื่อสารที่ไกล



รูปที่ 2.23 การสื่อสารแบบที่คลื่นเดินทาง 2 ฮอป

2.2.7 การจางหาย

การสื่อสารทางคลื่นฟ้า นั้นความแรงสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอเดี๋ยวอ่อนเดี๋ยวแรงถ้าระดับสัญญาณกระเพื่อมน้อย ระบบ AGC ในเครื่องรับก็จะชดเชยระดับสัญญาณที่รับได้ ทำให้ความดังคงที่แต่บางครั้งสัญญาณก็หายไปเฉยๆ เพราะถูกลดทอนมาก ปรัชญาการนี้เรียกว่าการจางหาย การจางหายนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการที่สัญญาณมาถึงเครื่องรับจากหลายเส้นทางในบางครั้งก็มาเสริมกันหรือหักล้างกันซึ่งเรียกว่ามัลติพาท (multipath) และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ จากรูปที่ 2.24 (ก) สัญญาณจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับจากหลายเส้นทางคือ มาแบบฮอปเดียวและ 2 ฮอป ในกรณีนี้คลื่น ทั้งสองจะเดินทางมาถึงเครื่องรับไม่พร้อมกัน เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเฟส ผลรวมของคลื่นทั้งสองอาจจะเสริมกันบ้างหรือหักล้างกันเองบ้างแล้วแต่การเดินทาง เช่นถ้าหากคลื่นมีเฟสต่างกัน 180 องศา (หรือครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น) คลื่นก็จะหักล้างกันเอง



การจางหายเนื่องจากการ รั่วคลื่นดินและคลื่นฟ้า

(ข)

รูปที่ 2.24 การรับสัญญาณามัลติพาธ

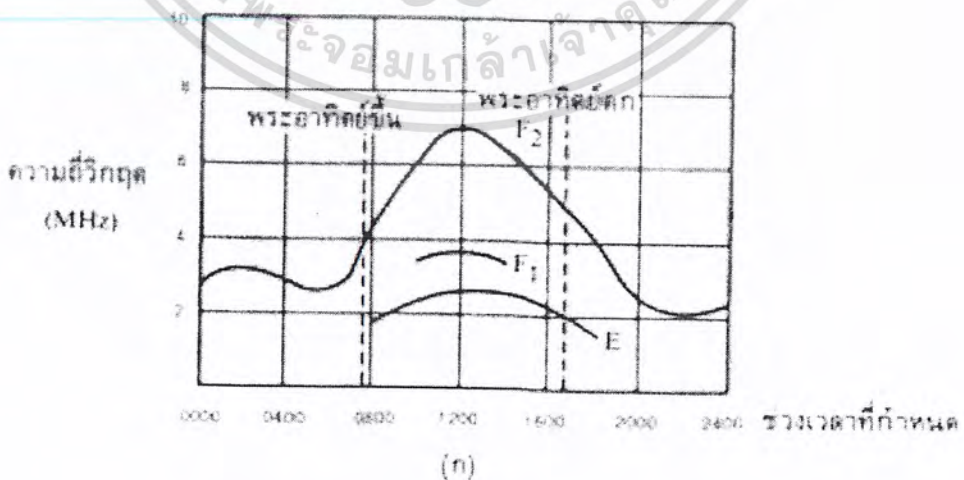
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจางหายของคลื่นฟ้าจึงเกิดขึ้นได้เสมอ ดังรูปที่ 2.24 (ข) นอกจากนี้คลื่นที่รับได้ที่เครื่องรับอาจมาจากทั้งคลื่นฟ้าและคลื่นดินทำให้เฟสของสัญญาณที่มาถึงไม่ตรงกัน การจางหายก็เกิดขึ้น กรณีหลังนี้จะเกิดเฉพาะคลื่นในย่านความถี่ MF ดังรูปที่ 2.24 (ก)

2.2.8 การเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์

ชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีของดวงอาทิตย์ ฉะนั้นการโคจรของดวงอาทิตย์และโลกจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์มนุษย์เราเฝ้าสังเกตการเปลี่ยนแปลงทั้งปวงจนจับ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงได้ว่า แบ่งออกเป็น การเปลี่ยนแปลงประจำวัน (Diurnal) การเปลี่ยนแปลงประจำฤดูกาล (seasonal) การเปลี่ยนแปลงตามลักษณะภูมิศาสตร์ (geographical) รวมทั้ง กฏเปลี่ยนแปลง ครอบรอบ (cyclical)

การเปลี่ยนแปลงประจำวัน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงในแต่ละชั่วโมง เนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของโลก สรุปการเปลี่ยนแปลงประจำวันได้ว่าชั้น D, E และ F₁ จะขึ้นอยู่กับความสูงของดวงอาทิตย์เหนือขอบฟ้า การเกิดไอออนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากตอนเช้าดวงอาทิตย์โผล่จากขอบฟ้า จนถึงเที่ยงวัน ไอออนจะมากที่สุดแล้วค่อยๆ ลดลงจนเพราะอาทิตย์ลับขอบฟ้า ชั้น D, E และ F₁ จะหายไปในตอนกลางคืน ในรูปที่ 2.25 แสดงให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในรูป ของความถี่วิกฤต จะเห็นว่าชั้น F₂ จะสูงขึ้นเมื่อดวงอาทิตย์ขึ้นแล้วค่อยๆ ลดลงเมื่อดวงอาทิตย์ตก และชั้น F₂ ก็ยังคงมีอยู่ในตอนกลางคืน



รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ประจำวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



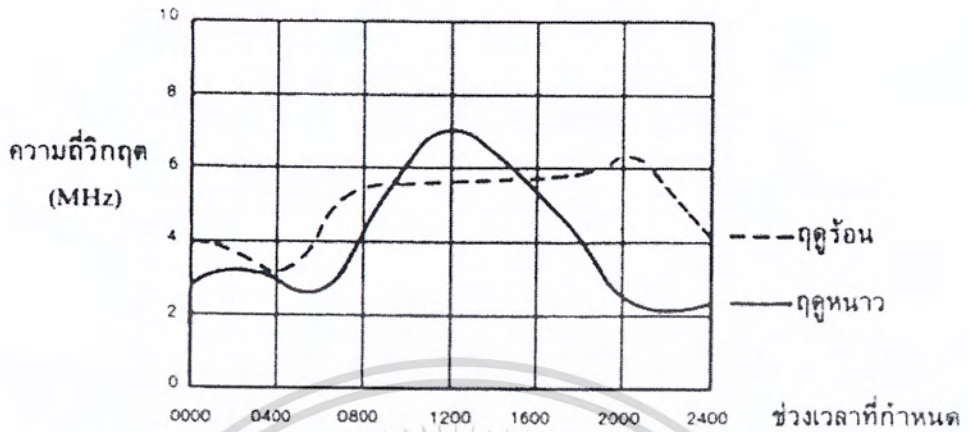
รูปที่ 2.25 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ประจำวัน

เนื่องจากโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ ระยะทางจาก (จุดบน) โลกไปยังดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลง ด้วยการเปลี่ยนแปลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ก็จะเป็นไปตามฤดูกาล จากรูปที่ 2.25 แสดงการเปลี่ยนแปลง ประวัณฤดูกาลของความถี่วิกฤต F2 จะเห็นว่าในฤดูหนาวโลกอยู่ใกล้ดวงอาทิตย์มากกว่าฤดูร้อนจึง ได้รับรังสีมากกว่า ความถี่วิกฤตตอนเที่ยงวันจึงสูงกว่า

ปริมาณของรังสีที่กระทบชั้นไอโอโนสเฟียร์ขึ้นอยู่กับเส้นรุ้งหรือละติจูด(Latitude) เช่นรังสีจะเข้มข้นที่เส้นศูนย์สูตรในขณะที่ดวงอาทิตย์อยู่ตรงศรีษะพอดีและที่เส้นละติจูดไปทางทิศเหนือและใต้จะเข้มข้นน้อยลง การเปลี่ยนแปลงปริมาณ ไอออนจึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเส้นรุ้ง หรือลักษณะทางภูมิศาสตร์ด้วย

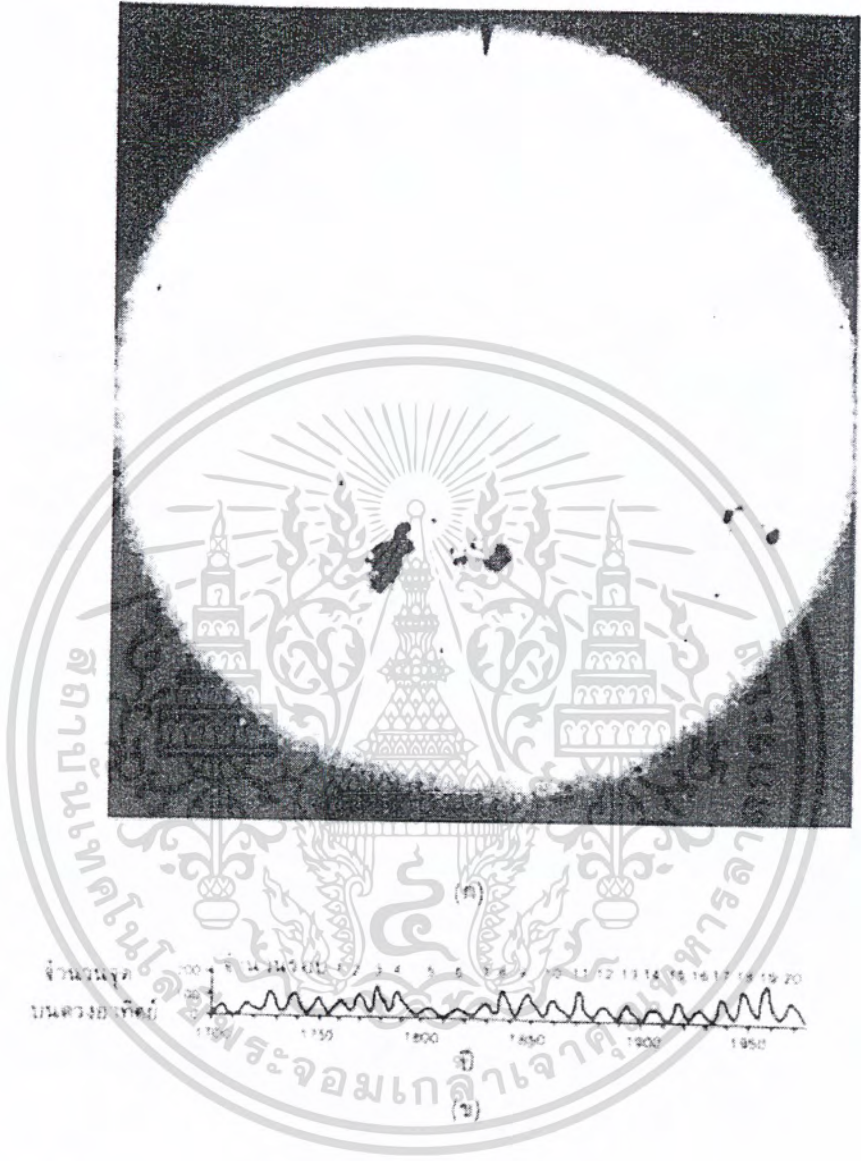
นอกจากนี้ เวลาครบรอบของจุดบนดวงอาทิตย์เท่ากับ 11 ปี จุดที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์มีอิทธิพล ต่อชั้นไอโอโนสเฟียร์มาก รูปที่ 2.26 แสดงจำนวนจุดบนดวงอาทิตย์ในอดีตที่ผ่านมา จำนวนจุดบนดวงอาทิตย์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



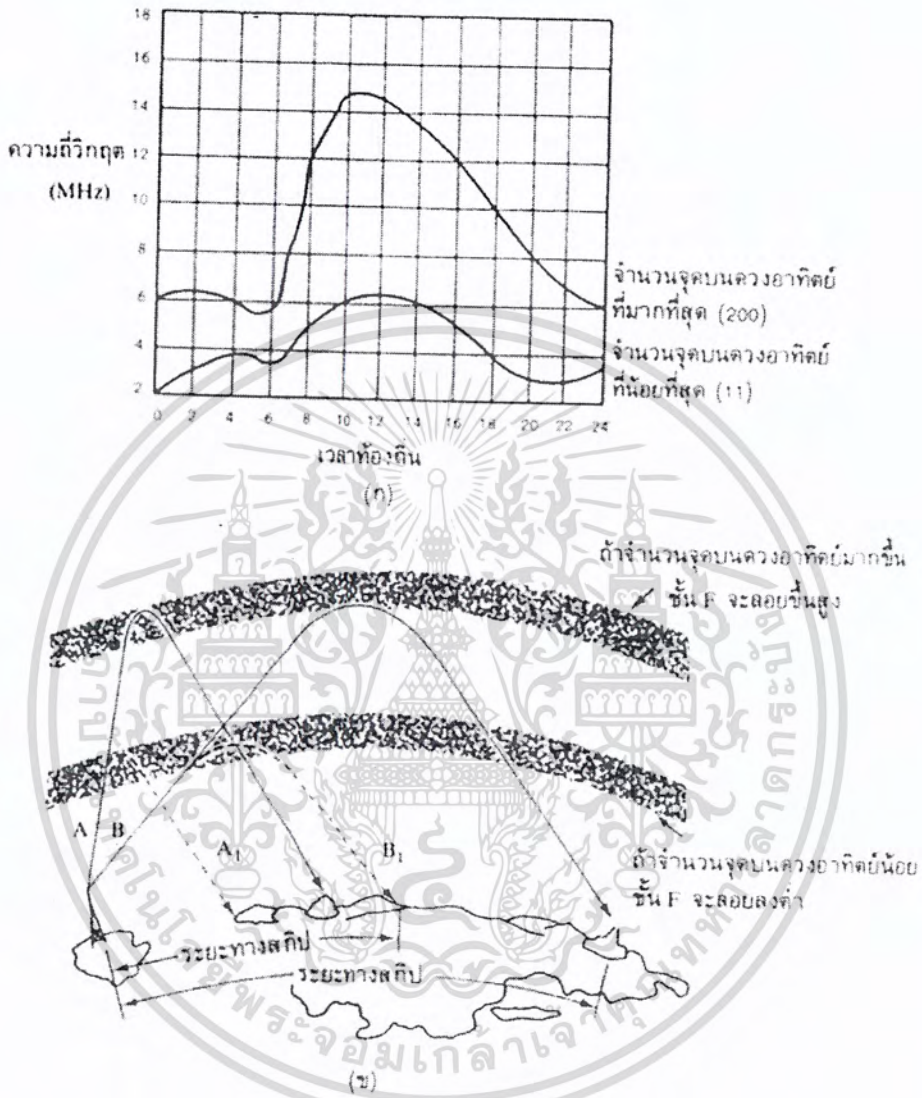
รูปที่ 2.26 การเปลี่ยนแปลงของชั้นF2 ในฤดูร้อนกับฤดูหนาว

คือ จุดยิ่งมารังสียิ่งเข้มข้นรังสีนี้จะมีอิทธิพลในการเกิดไอออนในชั้น ไอโอโนสเฟียร์ จากรูปที่ 2.26 จะเห็นว่าความถี่วิกฤตสำหรับชั้น F2 ในปีที่มียุคดับมากและน้อยจะแตกต่างกันกว่าเท่าตัวการที่มีจุด มากๆ มักจะส่งผลให้การสื่อสารไปได้ไกลขึ้นและความแน่นอนในการสื่อสารทางคลื่นฟ้าดีขึ้น



รูปที่ 2.27 จุดของดวงอาทิตย์ (รูป ก.) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของไอโอโนสเฟียร์ (ตามรูป ข.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของชั้น F2 ที่จำนวนจุดดับในดวงอาทิตย์มากที่สุด และน้อยสุด

นอกจากความเปลี่ยนแปลงในชั้น ไอโอโนสเฟียร์ประจำวันประจำฤดูกาล ตำแหน่งหรือ ลักษณะ ทางภูมิศาสตร์และการเปลี่ยนแปลงตามเวลาครบรอบ 11 ปี ของจุดแล้ว ตามที่ศึกษามา ข้างต้นนี้ ชั้น ไอโอโนสเฟียร์ยังมีความเปลี่ยนแปลงอื่นๆ อีก ความเปลี่ยนแปลงนี้ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนนักหรือไม่สามารถ ทำนายได้โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลต่อความถี่ย่าน HF ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของการลดทอนที่ละน้อยหรือบางครั้งก็ลดทอนอย่างฉับพลันจนสัญญาณหายไปเฉยๆ แต่ในทางตรงกันข้ามสำหรับความถี่ย่าน

2.2.9 การแพร่กระจายคลื่นย่านความถี่ VHF และ UHF

การสื่อสารทางคลื่นฟ้าจะใช้ได้เฉพาะในย่านความถี่ HF เท่านั้น เนื่องจากความถี่ในย่านนี้จะมีค่าไม่เกิน 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึงแม้จะเป็นในช่วงที่จุดบนดวงอาทิตย์มากที่สุดความถี่ MUF ก็จะสามารถขึ้นไปได้เพียง 50 ถึง 60 เมกะเฮิร์ตซ์ เท่านั้น ด้วยเหตุนี้การสื่อสารด้วยคลื่นในย่านความถี่ VHF และ UHF จึงต้องใช้คลื่นอวกาศซึ่งเดินทางไปได้ไม่เกินระยะสายตา วัตถุประสงค์สำคัญของการสื่อสารในย่านความถี่ VHF และ UHF นี้ก็คือ ภูมิประเทศและความโค้งของผิวโลกบังคับคลื่นเอาไว้ ความจริงแล้วอากาศบนผิวโลกนี้สามารถหักเหคลื่นในย่านความถี่ VHF และ UHF ได้เล็กน้อย สาเหตุของการหักเหก็เนื่องมาจาก เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของอากาศจะลดลง นั่นคือคลื่นส่วนบนย่อมเดินทางเร็วกว่าคลื่นส่วนล่าง ทำให้คลื่น โค้งเข้าหาผิวโลกจึงดูเหมือนกับว่าระยะสายตา (ระยะทางที่คลื่นเดินทางไปพ้นขอบฟ้า) ไกลกว่าปกติ 1.3 เท่า (ระยะสายตาในกรณีที่คลื่นไม่หักเห) ระยะสายตา (LOS) หาได้จากสูตร

$$D_s = 4\sqrt{H_t} \quad (2.10)$$

ในที่นี้ D_s คือ ระยะสายตามีหน่วยเป็นกิโลเมตร

H_t คือ ความสูงของสายอากาศมีหน่วยเป็นเมตร

ในกรณีของเครื่องรับก็ใช้สูตรนี้เช่นกัน ทำให้เราสามารถคำนวณหาระยะทางที่สามารถติดต่อกันด้วยคลื่นอวกาศได้คือ

$$\begin{aligned} D &= D_s + D_r \\ &= 4\sqrt{H_t} + 4\sqrt{H_r} \end{aligned} \quad (2.11)$$

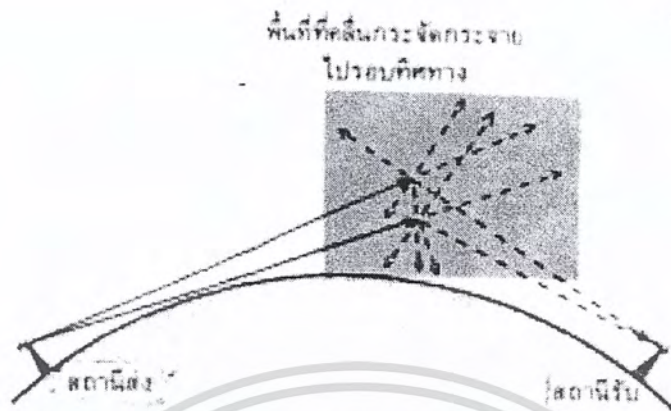
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 ระยะสายตา

2.2.10 การแพร่กระจายคลื่นแบบโทรโปสแกตเตอร์

ในการสื่อสารแบบโทรโปสแกตเตอร์ (troposcatter หรือ tropospheric scatter) นี้ เราใช้เครื่องส่ง ที่มีกำลังส่งสูงมากและใช้สายอากาศที่มีแกนสูง ส่งออกอากาศขึ้นไป (คล้าย ๆ กับส่งคลื่นไฟฟ้า) โดยยิง ออกไปให้กระทบชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์พลังงานของคลื่นบางส่วนซึ่งน้อยมากจะกระจัดกระจายไปยังทิศทางของเครื่องรับ ขบวนการกระจายคลื่นนี้ ยังไม่มีคำอธิบายที่เป็นที่ยอมรับ แต่ในทางทฤษฎีบอกว่าการ สะท้อนเกิดขึ้นเพราะชั้นบรรยากาศอย่างไรก็ตาม การสื่อสาร โดยวิธีโทรโปสแกตเตอร์นี้ มีความแน่นอน สูงมาก และทำให้สามารถสื่อสาร โดยใช้คลื่นย่านความถี่ UHF หรือสูงกว่านี้ ออกไปไกลกว่าระยะสายตา รูปที่ 2.30



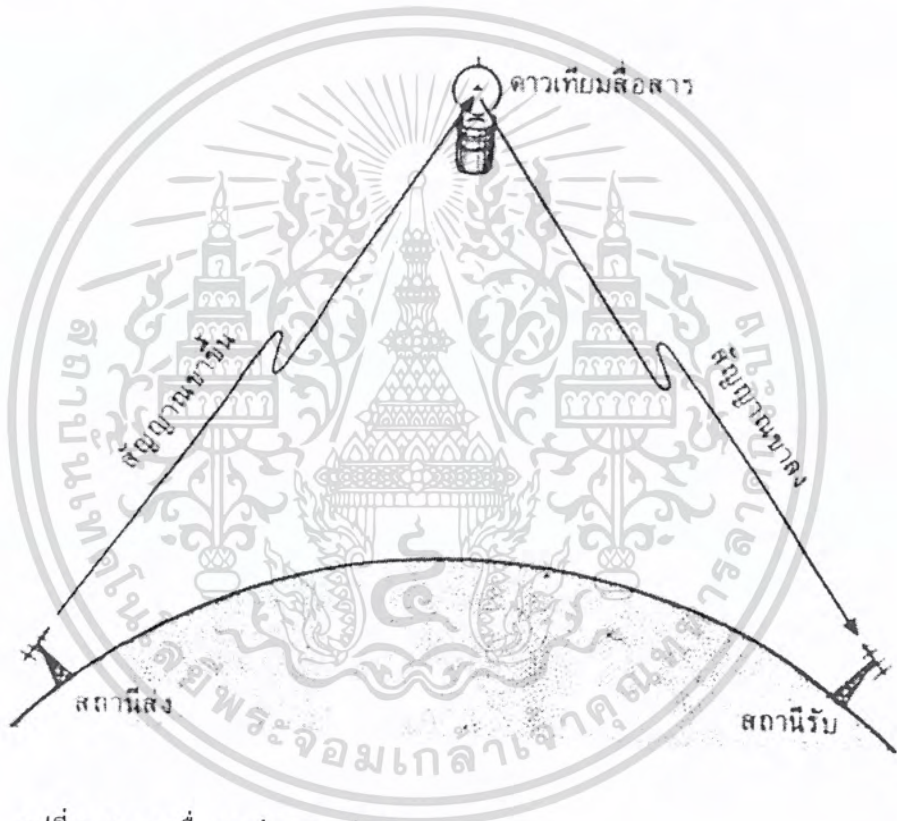
รูปที่ 2.30 การแพร่คลื่นแบบโทรโปสเฟียร์

ความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารโทรโปสเฟียร์ ก็คือ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ ระยะทางติดต่อได้ไกลตั้งแต่ 300 ถึง 1000 กิโลเมตร (ถ้าใช้คลื่นอวกาศจะไปได้ไม่เกิน 100 กิโลเมตร) ข้อเสียของการสื่อสารโทรโปสเฟียร์ก็คือต้องใช้กำลังส่งสูงมาก และเสาอากาศต้องมีแกนสูง วิธีโทรโปสเฟียร์เมื่อเทียบกับการสื่อสารโดยใช้คลื่นอวกาศและรีเฟลคเตอร์เชื่อมต่อกัน วิธีโทรโปสเฟียร์ก็ยิ่งแพงกว่ามากอย่างไรก็ตาม ถ้าภูมิประเทศเป็นอุปสรรคอย่างมากในการติดตั้งสถานีรีเฟลคเตอร์ หรือด้วยเหตุผลอื่น ๆ วิธีโทรโปสเฟียร์ก็นับเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่ง ตัวอย่างการใช้งานของระบบโทรโปสเฟียร์ ได้แก่ การติดต่อสื่อสารไปยังแท่นขุดเจาะน้ำมันในทะเลเหนือป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.11 การสื่อสารผ่านดาวเทียม

ดาวเทียมสื่อสาร ก็คือ สถานีรีพีตเตอร์ไมโครเวฟนั่นเองดาวเทียมจะรับสัญญาณขาขึ้น (up link) จากโลกทำการขยายให้มีความแรงมากขึ้นแล้วจึงส่งสัญญาณขาลง (down link) กลับมายังผิวโลก ความถี่ขาขึ้นกับขาลงจะไม่เท่ากันเนื่องจากตำแหน่งของดาวเทียมอยู่สูงจากโลกมาก

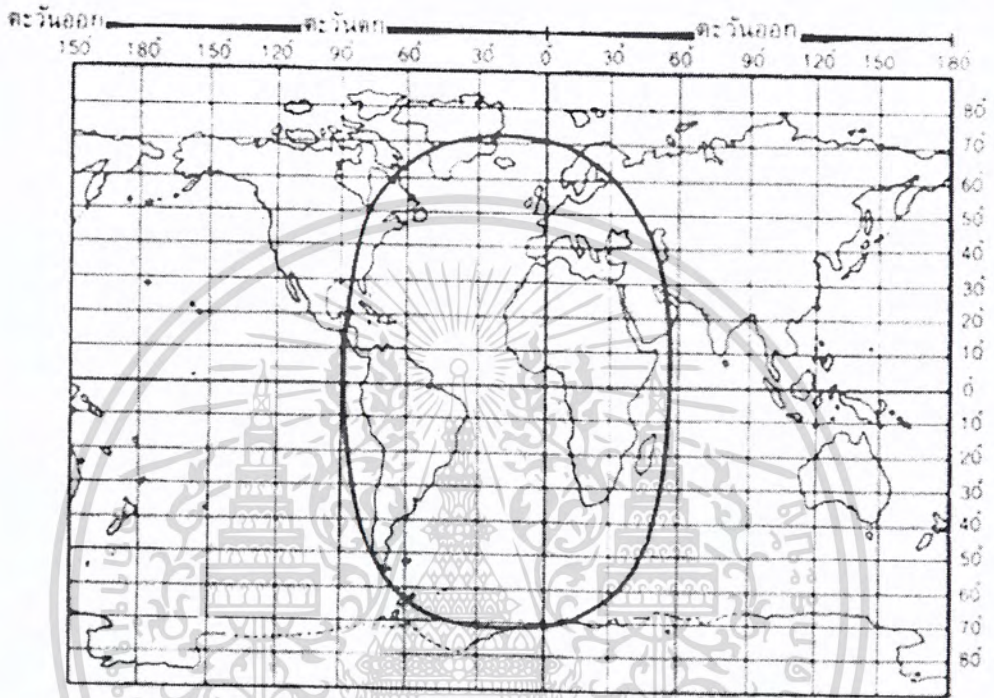


รูปที่ 2.31 การสื่อสารผ่านดาวเทียม

ดาวเทียมส่วนใหญ่จะลอยค้างฟ้าอยู่ในวงโคจรซิงโครนัส (synchronous orbit) กล่าวคือ ลอยนิ่ง อยู่ในอากาศเหนือเส้นศูนย์สูตรประมาณ 35,800 กิโลเมตร เวลาโคจรรอบโลกจะต้องเท่ากับ เวลาที่โลก หมุนรอบตัวเองคือ 24 ชั่วโมง ฉะนั้น ความเร็วเชิงมุม (angular velocity) ของดาวเทียม กับโลกจะต้องเท่ากันดาวเทียมประเภทนี้ เรียกว่าดาวเทียมค้างฟ้าเมื่อดาวเทียมลอยนิ่งอยู่บนฟ้าใน วงจรโคจรซิงโครนัส เราสามารถตั้งสายอากาศเล็งไปยังดาวเทียมได้ในรูปที่ 2.32 แสดงพื้นที่ใช้งาน ซึ่งดาวเทียมค้างฟ้าสามารถ ครอบคลุมได้ ดาวเทียมดวงนี้ ลอยอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรค่อนไปทางทิศ ตะวันตก 15 องศา จากแผนที่นี้ เราจะเห็นว่า เราใช้ดาวเทียมเพียง 3 ดวง ก็จะสามารถครอบคลุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่ของโลกได้เกือบทั้งหมดแต่ในทางปฏิบัติเราใช้จำนวนดาวเทียมมากมายเนื่องจากปริมาณ
ข่าวสารที่ติดต่อสื่อสารกันมีมากจนดาวเทียมดวงเดียวไม่สามารถทำได้



รูปที่ 2.32 พื้นที่ใช้งานของดาวเทียม

สำหรับดาวเทียมประจำชาติหรือดาวเทียมภายในประเทศ(Domestic) จะต้องใช้สายอากาศพิเศษ เพื่อควบคุมพื้นที่ใช้งานให้อยู่เฉพาะประเทศของตัวเองในรูปที่ 2.33 แสดงให้เห็นดาวเทียมที่ครอบคลุม พื้นที่ของประเทศสหรัฐอเมริกา ดาวเทียมจะประกอบด้วยสายอากาศ (ตัวเดียวใช้ทั้งรับและส่ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 ดาวเทียมประจำชาติและพื้นที่ใช้งาน

เครื่องรับและเครื่องส่งซึ่งเรียกรวมๆ ว่า ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) เครื่องจะไม่มีคิมอด สัญญาณจากเครื่องส่ง สัญญาณขาขึ้นความถี่ 6 กิกะเฮิร์ตซ์ที่รับได้ จะถูกขยายและเฮตเทอโรคายน้าให้ เนื่องจากกำลังที่ใช้จะต้องให้น้อยที่สุด ดังนั้นกำลังส่งของเครื่องส่งจะต้องไม่มากเกินไปจนเกินความจำเป็น นอกจากนี้ สถานีภาคพื้นดินก็ใช้สายอากาศแกนสูงเครื่องส่งกำลังสูงและเครื่องรับที่มีความไวสูงอยู่แล้ว

2.3 การสื่อสารในระบบอนาล็อก (Analog communications)

การสื่อสารโดยใช้ สัญญาณอนาล็อกนั้น มีวิธีการที่จะทำให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลและส่งได้ปริมาณ มากขึ้น ด้วยการมอดูเลตสัญญาณ (signal modulation) คือการผสมสัญญาณที่ต้องการส่งเข้ากับสัญญาณพาหะ (carrier) มี ผลให้สัญญาณที่ ผสมแล้วมี สเปกตรัมความถี่ อยู่ที่ความถี่ พาหะการมอดูเลตจึงเป็น การย้ายความถี่ของสัญญาณให้ ไปอยู่ที่ความถี่พาหะซึ่งทำให้ได้ช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นคือถ้าส่งสัญญาณไปโดยไม่มอดูเลตจะส่งไป ได้ สัญญาณเดียวในแต่ละเวลาเนื่องจากสัญญาณมี สเปกตรัมความถี่ช่วงเดียวกัน แต่เมื่อมอดูเลตสัญญาณให้ ไปอยู่ที่ ความถี่พาหะที่ ต่างกันก็สามารถส่งไปได้ พร้อมกันโดยไม่รบกวนกันตัวอย่างเช่น สถานีวิทยุ กระจายเสียงต่างๆ เป็นต้น นอกจากเพิ่มจำนวนช่องของสัญญาณแล้วการมอดูเลต โดยใช้คลื่นพาหะที่สูงขึ้น ทำให้ได้ขนาดของ ช่องสัญญาณที่กว้างขึ้นเนื่องจากวงจรฟิลเตอร์ที่ใช้ ในการเลือกสัญญาณ ไม่ได้เป็นแบบอุดมคติค่าแบนด์วิดท์จะมีความสัมพันธ์กันค่า Q ของวงจรคือ $B=f/Q$ เป็น 3-dB bandwidth f_0 เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ กลางของฟิลเตอร์ ในวงจรที่ดี เราต้องการค่า Q สูงเพื่อความสามารถในการและความถี่ (selectivity) ที่ดีการที่จะได้แบนด์วิดท์ที่สูงขึ้นด้วยจึงจำเป็นต้องใช้ที่ ความถี่สูง ω โดยปกติค่าแบนด์วิดท์ที่ใช้กันคือประมาณ 10% ของความถี่ ω หรือความถี่ พาหะ อีก เหตุผลหนึ่งของการมอดูเลตสัญญาณคือทำให้ การสื่อสารโดยใช้ คลื่นแม่เหล็ก วิทยุผ่านอากาศสามารถทำได้ง่าย มีประสิทธิภาพเมื่อขนาดของสายอากาศใกล้ เคียงกับความยาวคลื่น นั่นคือสามารถลดขนาดของสายอากาศได้เมื่อ ใช้ ความถี่สูงขึ้น พิจารณาสัญญาณแบบชายนี่ซึ่งสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังสมการ 2.12

$$v(t) = A_c \cos \theta_c = A_c \cos[\omega_c t + \phi_c] \quad (2.12)$$

เมื่อ A_c $\cos \omega$ เป็นขนาดความถี่เชิงมุมและมุมเฟสของพาหะตามลำดับการที่จะใช้พาหะในการส่งสัญญาณทำได้โดยให้ พาหะมีการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณที่ต้องการส่งนั้นแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือการเปลี่ยน ขนาด A_c ให้แปรตามสัญญาณที่ต้องการส่งเป็นการมอดูเลตเชิงเส้น (linear modulation) เรียกว่า amplitude modulation ส่วน การเปลี่ยน ตามสัญญาณที่ต้องการส่งนั้นเป็นการมอดูเลตเชิงมุม (angle modulation) แต่ การเปลี่ยน นั้นทำได้สองแบบคือการเปลี่ยนความถี่เชิงมุมของพาหะ (θ_c) จะเรียกว่า frequency modulation และการเปลี่ยนมุม θ_c เฟสของพาหะ (ϕ_c) เรียกว่า phase modulation การเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ของพาหะดังกล่าวทำให้ทางด้านรับตรวจจับการเปลี่ยนแปลงนั้นได้เป็นสัญญาณที่ต้องการส่งมาได้

2.3.1 การมอดูเลตเชิงเส้น (Linear modulations)

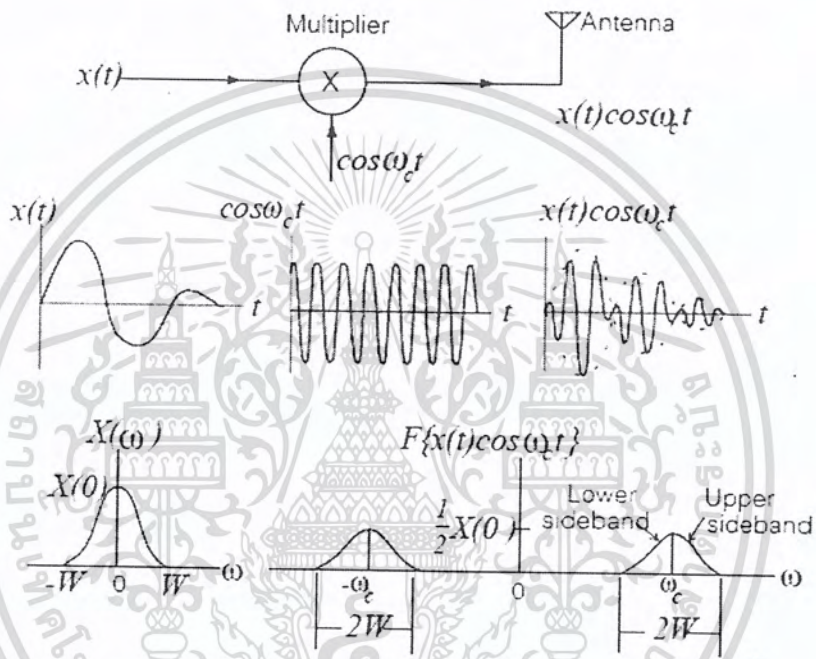
ในการมอดูเลต โดยขนาดนั้น เฟสของสัญญาณพาหะจะเป็นศูนย์หรือคงที่ ในขณะที่ ขนาดจะเปลี่ยนตามสัญญาณ เข้า เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$x_c(t) = x(t) \cos \omega_c t \quad (2.13)$$

$x(t)$ เป็นสัญญาณที่ต้องการมอดูเลต $\cos \omega_c t$ เป็นพาหะ $x_c t$ เป็นสัญญาณที่มอดูเลตแล้วเมื่อทำฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์ม $x_c t$ จะได้

$$X_c(\omega) = \frac{X(\omega + \omega_c)}{2} + \frac{X(\omega - \omega_c)}{2} \tag{2.14}$$

รูปสัญญาณและสเปกตรัมแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 สัญญาณทางเวลาและทางความถี่ของสัญญาณที่มอดูเลต

จะเห็นว่าสัญญาณเดิมมีความถี่ใกล้เคียงศูนย์มีแบนด์วิดท์ W เรียกว่าเป็นสัญญาณเบสแบนด์ (baseband) เมื่อ มอดูเลตแล้วจะมีความถี่ รอบๆ $c\omega$ และ $-c\omega$ โดยสัญญาณส่วนที่เป็นความถี่ลบเดิมจะปรากฏในความถี่บวกด้วย ทำให้ แบนด์วิดท์ ของสัญญาณเป็น $2W$ เรียกว่าเป็น double sideband โดยส่วนกว้าง W ที่อยู่ที่ความถี่ สูงกว่า ω_c จะเรียกว่าเป็น upper sideband และส่วนที่อยู่ ที่ความถี่ต่ำกว่า ω_c เรียกว่า lower sideband ในการใช้ งานสามารถ จะส่งสัญญาณไปได้หลาย ลักษณะ โดยสามารถนำสัญญาณเดิมกลับคืนมาได้ได้แก่

1. Double Sideband Large Carrier, DSB-LC หรือสัญญาณ AM ที่ ใช้ ในวิทยุกระจายเสียง จะส่งทั้งสอง sideband รวมทั้งเฉพาะพาหะไปด้วยเพื่อให้เครื่องรับง่ายแก่การนำสัญญาณเดิมกลับคืนมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Double Sideband Suppressed Carrier, DSB-SC ส่งทั้งสองsideband เหมือน AM แต่ไม่ส่งพาหะไป ด้วยเนื่องจากจะสูญเสียกำลังมากในการส่งเฉพาะพาหะไปด้วยแต่ก็จะยุ่งยากในการนำสัญญาณกลับคืนมามากจะใช้กับวิทยุเคลื่อนที่ที่เรื่องกำลังเป็นเรื่องสำคัญ

3. Single Sideband, SSB จะส่ง sideband เดียวแต่ได้สัญญาณครบถ้วนและทำให้แบนด์วิดท์ต่ำเหมาะแก่การส่งในช่วงความถี่ที่มี การใช้งานหนาแน่น

4. Vestigial Sideband, VSB เป็นการส่ง sideband หนึ่งรวมกับบางส่วนของอีก sideband ไปด้วย เพื่อจะได้ส่วนสัญญาณที่ ความถี่ต่ำและเป็นการลดกำลังของพาหะด้วยจะใช้ในการส่งสัญญาณ โทรทัศน์ที่สัญญาณความถี่ต่ำมีความสำคัญ

2.3.1.1 การมอดูเลตแบบ AM (DSB-LC)

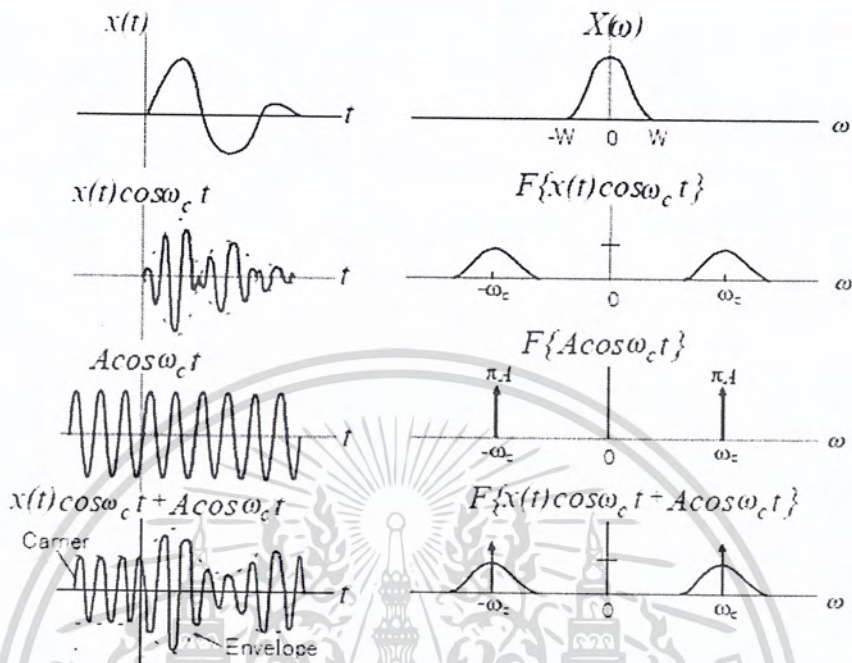
สัญญาณของการมอดูเลตแบบ AM นี้ สามารถเขียนได้ตามสมการ

$$x_{AM}(t) = x(t)\cos\omega_c t + A\cos\omega_c t \quad (2.15)$$

ซึ่งเมื่อนำไปหาความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณAM จะได้เป็น

$$X_{AM}(\omega) = \frac{X(\omega + \omega_c)}{2} + \frac{X(\omega - \omega_c)}{2} + \pi A\delta(\omega + \omega_c) + \pi A\delta(\omega - \omega_c) \quad (2.16)$$

รูปสัญญาณและความหนาแน่นสเปกตรัมแสดงในรูปที่ 2.35 จากสมการจะเห็นว่าสัญญาณ AM จะประกอบด้วยสัญญาณ DSB คือ $x(t)\cos\omega_c t$ และส่วนพาหะ $A\cos\omega_c t$ ปรากฏเป็นอิมพัลส์ที่ความถี่ ω_c ในสเปกตรัม

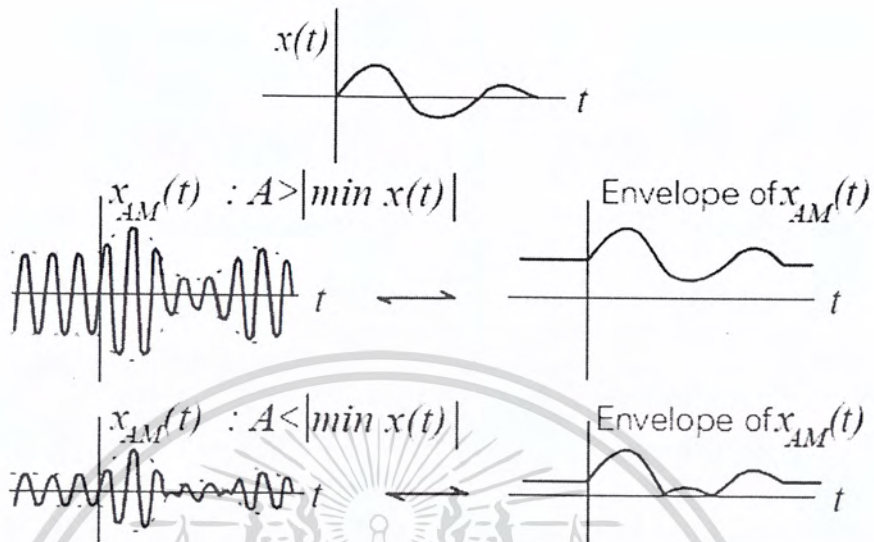


รูปที่ 2.35 สัญญาณ DSB-LC (AM) ทางเวลาและความถี่ จากสมการ 2.16 เขียนใหม่ได้เป็น

$$x_{AM}(t) = [A + x(t)] \cos \omega_c t \tag{2.17}$$

ขนาดของสัญญาณ AM เป็นผลรวมของขนาดสัญญาณ DSB-SC กับขนาดของพาหะซึ่งเปลี่ยนไปตามสัญญาณที่ นำมามอดูเลตเมื่อให้ขนาดของพาหะคงที่ จึงเห็นเหมือนกับสัญญาณที่ ซึ่ อยู่ บนพาหะ เป็นลักษณะที่ เรียกว่า envelope ดังรูปที่ 2.36 เมื่อขนาดของสัญญาณ DSB-SC มี ค่า สูงขึ้นมากกว่าขนาดของพาหะจะทำให้เกิดการเพี้ยนของสัญญาณได้ แฟกเตอร์ที่จะบอกอัตราส่วน ของขนาดทั้งสองเรียกว่า modulation index, m ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่าง peak ของ DSB-SC ต่อ peak ของพาหะ

$$m = \frac{\text{peak DSB-SC}}{\text{peak carrier}} \tag{2.18}$$



รูปที่ 2.36 สัญญาณ DSB-LC แสดงให้เห็นเมื่อสัญญาณที่เข้ามามีขนาดสูงกว่าพาหะ

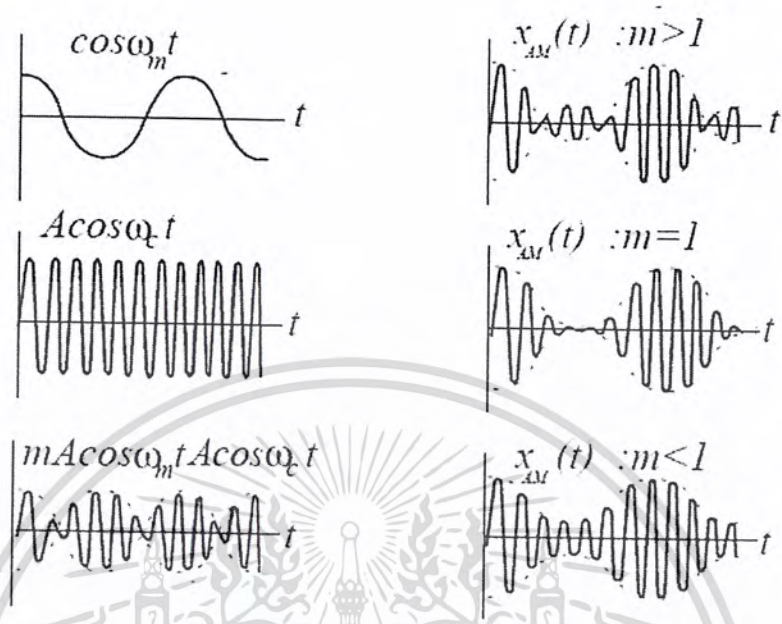
ในกรณีสัญญาณที่ นำมามีขนาดเป็นสัญญาณเสียงความถี่ เดียว (one tone) คือ $\cos \omega_m t$ สัญญาณ AM ได้เป็น

$$x_{AM}(t) = A \cos \omega_c t + m A \cos \omega_m t \cos \omega_c t = A(1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_c t \quad (2.19)$$

ผลของการมอดูเลตด้วย m ค่าต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.37 โดยทั่วไปก็จะนิยามเป็น percent of modulation สำหรับ DSB-LC เป็น

$$\begin{aligned} \%mod. &= \frac{[(\text{max. magnitude}) - (\text{min. magnitude})]}{[(\text{max. magnitude}) + (\text{min. magnitude})]} \\ &= \frac{(1+m)A - (1-m)A}{(1+m)A + (1-m)A} \times 100 \\ &= m \times 100 \quad [\%] \end{aligned} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 สัญญาณ AM ที่ มอดูเลตด้วยดัชนีมอดูเลตต่างกัน

กำลังของพาหะและกำลังของsideband ใน AM สัญญาณ AM นั้น จะมีส่วนที่เป็นเฉพาะพาหะโดยไม่มีข่าวสารใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับ $x(t)$ อยู่ ด้วยส่วนนี้เป็นการสูญเสียกำลังโดยไม่ได้ใช้ในการส่งสัญญาณใดๆ แต่ก็ต้องยอมเสียในกรณีที่ต้องการให้เครื่องรับง่ายแก่การสร้างและทำให้มีราคาถูกได้พิจารณาสัญญาณ AM จาก สมการ 2.20 เมื่อผ่านโหลด 1 โอห์ม กำลังเฉลี่ยได้จากค่ากำลังสองเฉลี่ย

$$x_{AM}^2(t) = x^2(t) \cos^2 \omega_c t + A^2 \cos^2 \omega_c t + 2Ax(t) \cos^2 \omega_c t \tag{2.21}$$

โดยทั่วไปแล้ว $x(t)$ จะเปลี่ยนแปลงช้ามากเมื่อเทียบกับ $\omega_c t$ ค่าเฉลี่ยของ $x(t)$ เท่ากับศูนย์ทำให้ได้

$$\begin{aligned} x_{AM}^2(t) &= x^2(t) \cos^2 \omega_c t + A^2 \cos^2 \omega_c t \\ &= \frac{x^2(t)}{2} + \frac{A^2}{2} \end{aligned} \tag{2.22}$$

ถ้าให้กำลังทั้งหมดเป็น P_t สามารถเขียนในรูปผลบวกของกำลังพาหะ P_c และกำลังของ sideband P_s

$$P_r = \frac{A^2}{2} + \frac{x^2(t)}{2} = P_c + P_s \quad (2.23)$$

อัตราส่วนกำลังใน sideband กับกำลังทั้งหมดจะได้

$$\mu = \frac{P_s}{P_r} = \frac{x^2(t)}{A^2 + x^2(t)} \quad (2.24)$$

เมื่อลองนำไปพิจารณาการมอดูเลตสัญญาณความถี่เดียวที่มี modulation index (m) จะได้ว่า

$$\mu = \frac{m^2}{2 + m^2} \quad (2.25)$$

ค่าบอกประสิทธิภาพในการส่งในกรณีนี้ m มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของ AM คือ 33% ที่ m=1 กล่าวคือกำลังใน sideband เป็นส่วนที่ใช้สำหรับส่งข่าวสารมีค่าเพียง 33% ของกำลังที่ส่งไปทั้งหมด

2.3.1.2 การมอดูเลตแบบ DSB-SC

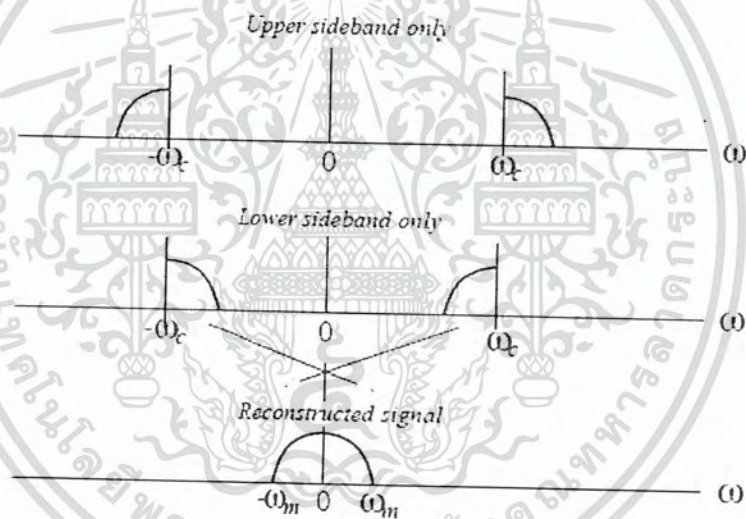
สัญญาณที่มอดูเลตแบบ DSB-SC นี้เขียนได้ ดังสมการที่ 3.15 เป็นการมอดูเลตแบบ AM โดยที่

$$x_{DSB}(t) = x(t) \cos \omega_c t \quad (2.26)$$

ไม่ส่งสัญญาณพาหะไปด้วยจึงมีแต่ส่วนที่เป็น sideband กำลังทั้งหมดจึงอยู่ใน sideband ประสิทธิภาพจะเท่ากับ 100% เป็นการประหยัดพลังงานในการส่งเนื่องจากกำลังที่ส่งไปถูกใช้ไปใน sideband บรรจุข่าวสารอยู่แต่การที่ไม่ส่งพาหะไปด้วยทำให้ทางเครื่องรับมีความยุ่งยากในการรับอาจเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณและเมื่อวงจรจะยุ่งยาก ก็ทำให้มี ราคาแพงขึ้น เพื่อให้การรับง่ายขึ้นและไม่ให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ โดยที่ กำลังสูญเสียในเครื่องส่งไม่มากนักก็จะเพิ่มความถี่ที่เหมือนพาหะขนาดเล็กๆ ส่งไปด้วยเรียกว่า pilot carrier ทางเครื่องรับสามารถสร้างสัญญาณพาหะขึ้นได้จาก pilot carrier นี้ เพื่อใช้ในการดีเทคสัญญาณทำให้เครื่องรับสร้างง่ายขึ้นและไม่เกิดการเพี้ยนของสัญญาณ ในขณะที่เครื่องส่งก็ประหยัดพลังงาน โดยที่ประสิทธิภาพจะลดลงเพียงเล็กน้อย

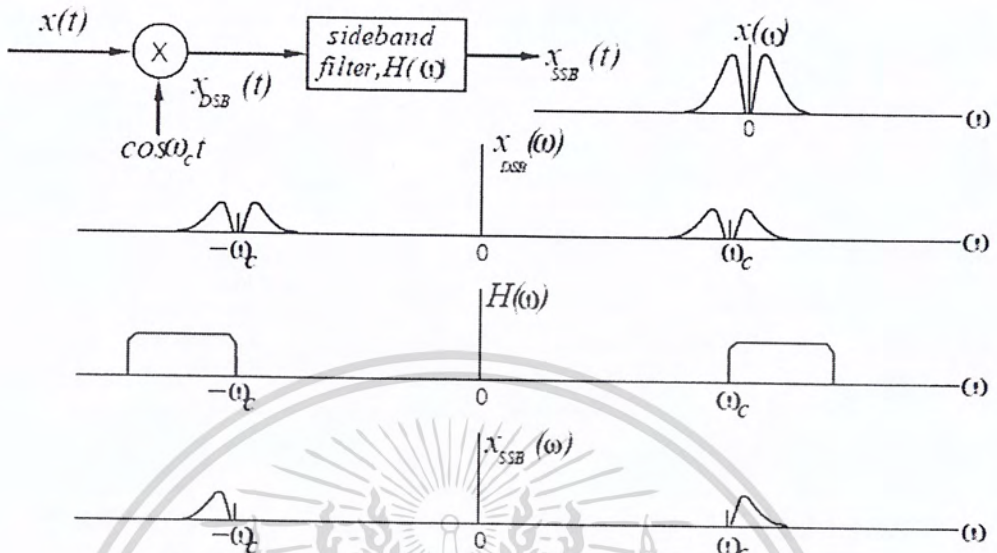
2.3.1.3 การมอดูเลตแบบ SSB

ในการมอดูเลตแบบ DSB สัญญาณที่มอดูเลตแล้วจะถูกส่งไปทั้งสอง sideband มีแบนด์วิดท์เป็นสองเท่าของแบนด์วิดท์ของสัญญาณเดิมทำให้เสียช่วงความถี่ไปมากในช่วงความถี่ที่มีความต้องการส่งสัญญาณมากช่องสัญญาณการลดแบนด์วิดท์จึงเป็นเรื่องสำคัญการส่งด้วย sideband เดียวและได้ข่าวสารครบถ้วนจึงเป็นทางออกในกรณีนี้ เรียก การมอดูเลตแบบนี้ว่า single sideband ,SSB พิจารณารูปที่ 2.38 จะเห็นว่าการส่งสัญญาณไปเฉพาะ sideband เดียวไม่ว่าจะเป็น upper หรือ lower sideband ก็ตามสามารถที่จะได้ สัญญาณเดิมกลับคืนมาในขั้นตอนการมอดูเลตเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.38 สเปกตรัมของสัญญาณ SSB

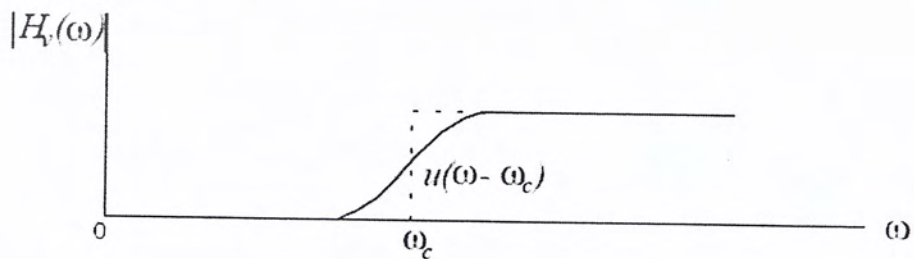
แต่ปัญหาที่คือการที่จะได้สัญญาณเฉพาะ side band เดียวเพื่อจะส่งไปนั้นปกติก็จะสร้างสัญญาณ DSB ก่อนแล้วใช้ฟิลเตอร์ ตัดเอาเฉพาะ sideband เดียว ฟิลเตอร์ที่ใช้จะต้องมีการตัดความถี่ ที่คมมากเพื่อจะตัด sideband หนึ่งออกไปในขณะที่ ต้องรักษาข้อมูลใน sideband ที่ ต้องการไว้ได้ ครบถ้วนคือลักษณะของฟิลเตอร์ ในอุดมคติ นั่นเองในทางปฏิบัติสำหรับกรณีของการส่งสัญญาณเสียงนั้น ช่วงความถี่ ต่ำมากใกล้ความถี่ 0 ของ สัญญาณเสียงหรือรอบๆ ความถี่ สำหรับสัญญาณที่ มอดูเลตแล้วจะไม่ค่อยมีความสำคัญนักสามารถตัดทิ้งไปได้ โดยที่ยังสามารถรับรู้ข้อความได้ ฟิลเตอร์ ในทางปฏิบัติ จึงถูกนำมาใช้ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.49



รูปที่ 2.39 SSB modulator ใช้ การกรองส่วน upper sideband

2.3.1.4 การมอดูเลตแบบ VSB

ในการมอดูเลตสัญญาณแบบ SSB นั้นการที่จะทำให้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างนั้นทำได้ยากเนื่องจากฟิลเตอร์ ต้องมีความคมมาก และในกรณี ที่ต้องการส่งสัญญาณความถี่ต่ำไปด้วยนั้นการมอดูเลตแบบ vestigial sideband นี้จะเป็นวิธีที่ประนีประนอมระหว่าง DSB กับ SSB จะมี sideband หนึ่งกับอีกบางส่วนของอีกsideband ด้วยส่วนที่เป็น ความถี่ต่ำ จึงถูกส่งไปได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของฟิลเตอร์ที่ใช้



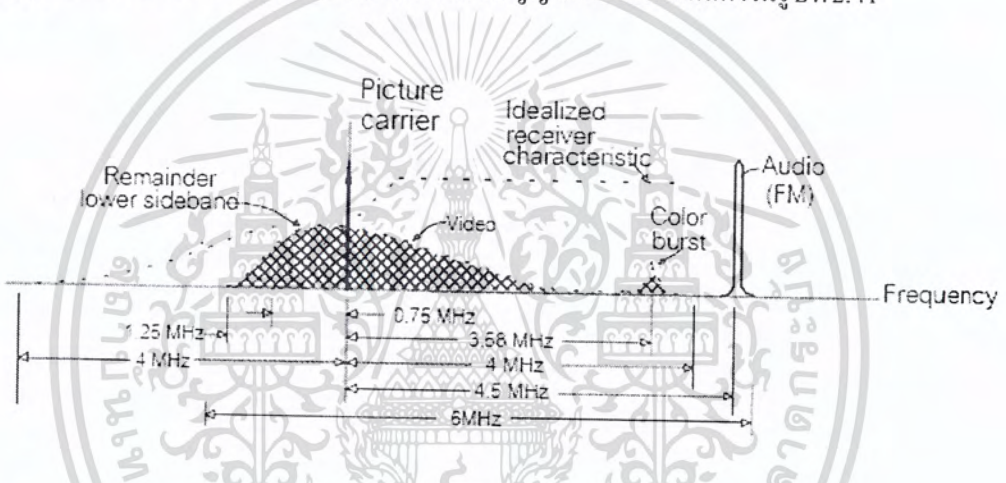
รูปที่ 2.40 ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองสำหรับVSB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ VSB จะมีรูปสมการเป็น

$$X_{VSB}(\omega) = \left[\frac{X(\omega - \omega_c)}{2} + \frac{X(\omega + \omega_c)}{2} \right] H_V(\omega) \tag{2.27}$$

เป็นการนำสัญญาณ DSB ผ่านฟิลเตอร์ที่มีทรานสเฟอร์ฟังก์ชันเป็นซึ่งอาจมีส่วนของพาหะ เช่นเดียวกับใน AM หรืออาจไม่มีพาหะส่งไปด้วยดังใน DSB-SC การมอดูเลตแบบนี้ใช้ในการส่งสัญญาณวิดีโอของสถานีโทรทัศน์ สเปกตรัมของสัญญาณโทรทัศน์แสดงในรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 สเปกตรัมของสัญญาณโทรทัศน์

2.3.1.5 การสร้างสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาด

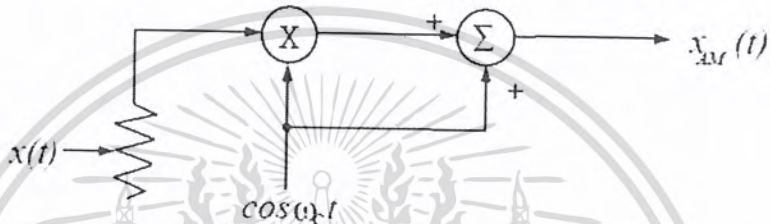
จะเห็นว่าสัญญาณมอดูเลตเชิงขนาดนั้นเป็นการคูณกันระหว่างสัญญาณที่ต้องการมอดูเลตกับพาหะซึ่งวิธีการที่จะได้ สัญญาณมอดูเลตเชิงขนาดออกมานั้นอาจแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

1. มอดูเลตแบบผลคูณ (Product modulation)
2. มอดูเลตโดยใช้คุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์
3. มอดูเลเตอร์แบบสวิตชิง (Switching modulator, chopper modulator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูเลตแบบผลคูณ (Product modulation)

เป็นวงจรคูณสัญญาณระหว่างสัญญาณที่ต้องการ มอดูเลตกับพาหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.42 เป็นการสร้างสัญญาณ DSB-LC ถ้าเป็น DSBSC ก็เพียงแต่ไม่ต้องมีขั้วบดก่อนการบวกพาหะเท่านั้นในรายละเอียดวงจรนั้นแล้วแต่ว่าจะใช้อุปกรณ์ ใดเป็นวงจรคูณสัญญาณนี้



รูปที่ 2.42 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณ DSB-LC

มอดูเลตโดยใช้คุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ในอุปกรณ์

เช่น ไดโอดจะมีความไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าเข้ากับค่าออกคือค่าออกอาจเป็นดังสมการ

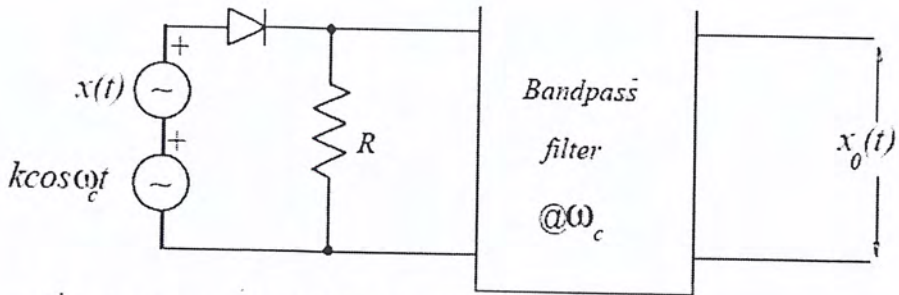
$$x_o(t) = a_1 x_i + a_2 x_i^2 \quad (2.28)$$

เมื่อให้สัญญาณขาเข้าเป็น $x(t) + \cos \omega_c t$ เป็นระบบเชิงเส้นควรจะได้ สัญญาณออก $x_o(t) = a_1 x(t) + a_1 \cos \omega_c t$ แต่เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นจึงทำให้ ได้เทอมกำลังสองออกมาด้วยบางครั้ง จึงเรียกการมอดูเลตแบบนี้ว่า การมอดูเลตแบบกฎกำลังสอง (square law modulation) คือ

$$x_o(t) = a_1 x(t) + a_2 x^2 + a_2 \cos^2 \omega_c t + a_1 \left[1 + 2 \frac{a_2}{a_1} x(t) \right] \cos \omega_c t \quad (2.29)$$

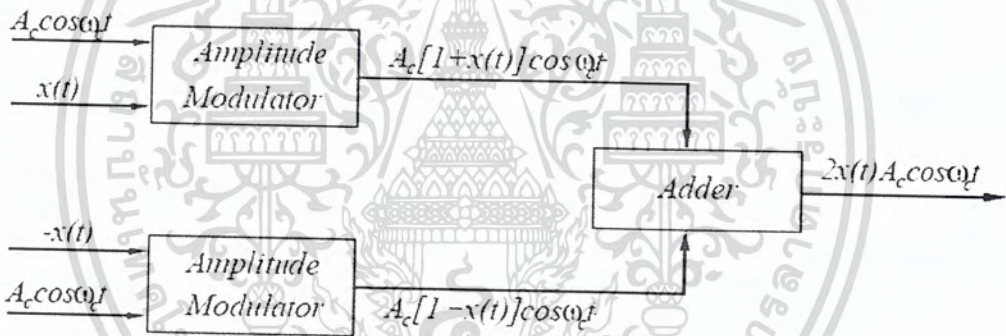
ในเทอมสุดท้ายก็คือสัญญาณ DSB-LC หรือ AM สัญญาณ AM นี้ จะถูกแยกออกมาโดยการใช้ฟิลเตอร์ในช่วง ω_c วงจรแสดงในรูป 2.43 สัญญาณตกคร่อม R คือสัญญาณตามสมการ 2.29 เมื่อผ่านฟิลเตอร์แล้วก็จะได้สัญญาณที่มอดูเลตแล้วแบบ DSB-LC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

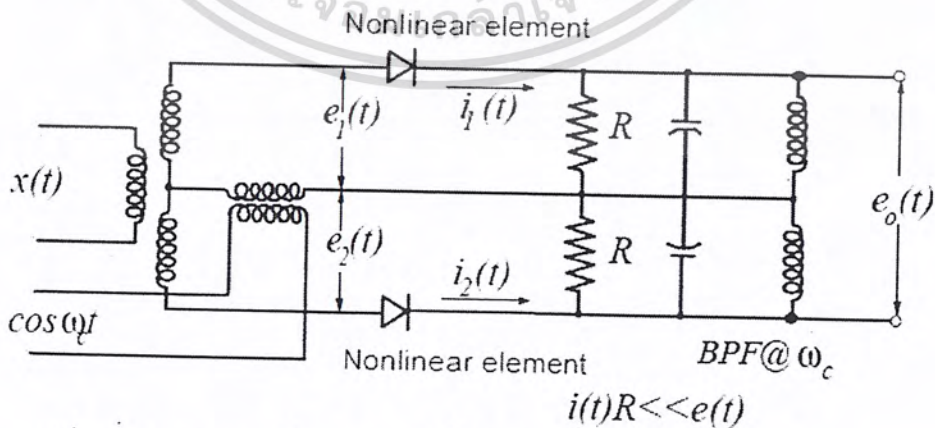


รูปที่ 2.43 วงจรกรองสำหรับสัญญาณ AM

สำหรับการมอดูเลตแบบ DSB-SC ด้วยวิธีนี้ทำได้โดยใช้วงจรลักษณะนี้สองวงจรให้สัญญาณเข้ากลับกันแล้วนำสัญญาณออกมารวมกันก็จะได้สัญญาณ DSB-SC ดังไดอะแกรมในรูปที่ 2.44 และวงจร ในรูปที่ 2.45 เรียก วงจรมอดูเลตแบบนี้ว่า บาลานซ์มอดูเลเตอร์ (balance modulator)



รูปที่ 2.44 การสร้างสัญญาณ DSB-SC จาก AM

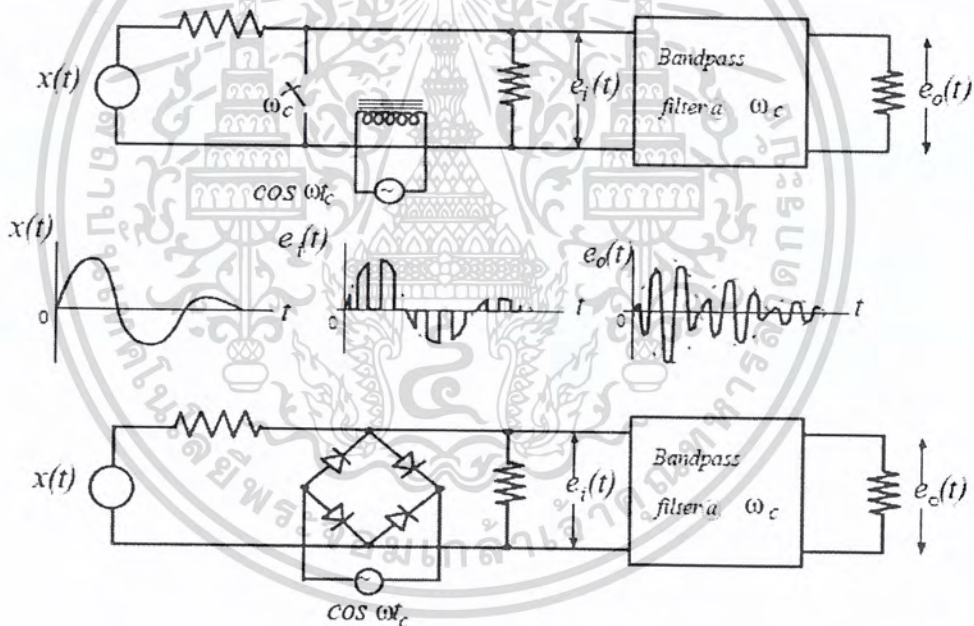


รูปที่ 2.45 วงจรบาลานซ์มอดูเลเตอร์ ที่ใช้อุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

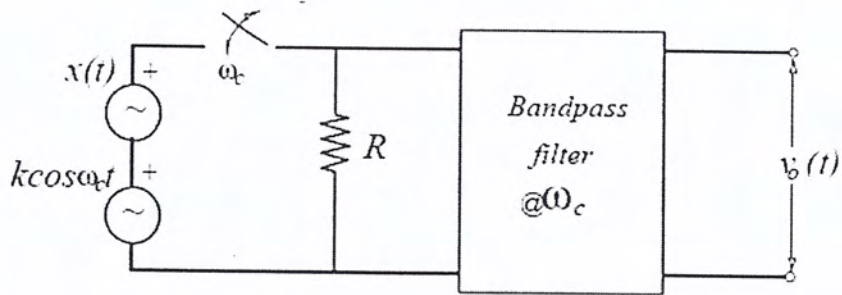
มอดูเลเตอร์แบบสวิตชิง (Switching modulator, chopper modulator)

จากวิธีการมอดูเลตที่ได้กล่าวไปแล้ว สัญญาณที่มอดูเลตแล้วยังมีขนาดต่ำ ต้องมีการขยายสัญญาณให้สูงขึ้นเมื่อต้องการกำลังส่งสูงๆ เช่น ในสถานีส่งแต่การใช้วงจรขยายกำลังสูงที่ความถี่สูงนี้อาจทำให้เกิดการเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรถ่าย มีผลทำให้เกิดความถี่ที่ไม่ต้องการไปปรากฏนอกแถบความถี่ที่ใช้งานเป็นการรบกวนระบบหรือสถานีอื่นได้ การมอดูเลตแบบสวิตชิงนี้ สัญญาณที่ต้องการมอดูเลตจะถูกขยายให้มีกำลังสูงก่อนแล้วจึงถูกตัดต่อ (switch, chop) ให้เป็นพัลส์สี่เหลี่ยมด้วยความถี่พาหะแล้วจึงผ่านฟิลเตอร์ก็จะได้สัญญาณที่มอดูเลตแล้วมีกำลังสูงตามต้องการดังวงจรแสดงในรูปที่ 2.46



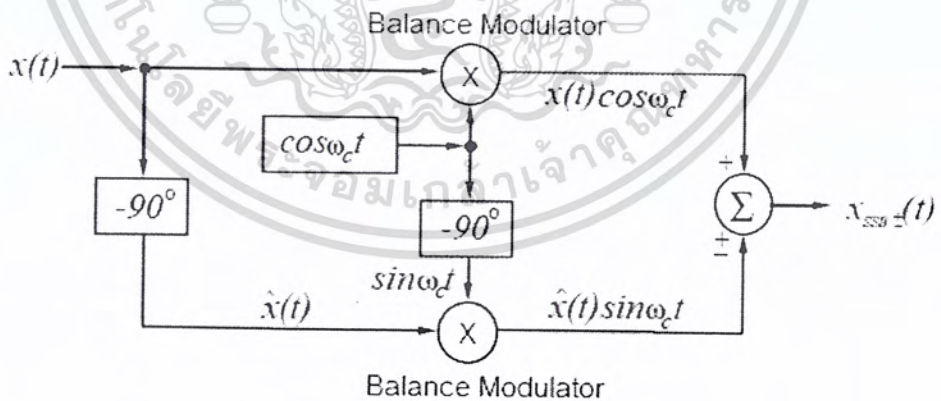
รูปที่ 2.46 วงจรมอดูเลตอร์สัญญาณ DSB แบบ chopper ที่ใช้สวิตซ์แม่เหล็กและใช้ไดโอดเป็นสวิตซ์

และถ้าเป็นสัญญาณ AM ทำได้ โดยการบวกแรงดัน DC ไปก่อนที่ จะทำการตัดต่อสัญญาณ ดังรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 วงจรมอดูเลเตอร์สัญญาณ AM แบบ chopper

สำหรับสัญญาณ SSB และ VSB นั้นสร้างได้จากสัญญาณ DSB-SC หรือ DSB-LC โดยใช้ฟิลเตอร์กรองเอาเฉพาะ sideband ที่ต้องการใน SSB ก็จะทำเฉพาะ sideband เดียวสำหรับ VSB ก็จะใช้ฟิลเตอร์ที่มีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $H_V(\omega)$ ถ้าสร้างจากสัญญาณ DSB-SC ก็จะไม่มีส่วนของพาหะ แต่ ถ้าสร้างจากสัญญาณ DSB-LC ก็จะมี ส่วนของพาหะอยู่ด้วย ทางเครื่องรับก็จะได้สัญญาณกลับคืนมาง่ายขึ้นดังที่ใช้กันในการส่งสัญญาณโทรทัศน์ โดยทั่วไปนอกจากการสร้างโดยใช้สัญญาณ DSB แล้วฟิลเตอร์เอาเฉพาะ sideband เดียวแล้วสัญญาณ SSB ยังสามารถสร้างได้ จากวิธีการเลื่อนเฟสของสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.48



รูปที่ 2.48 การสร้างสัญญาณ SSB โดยวิธีเลื่อนเฟส

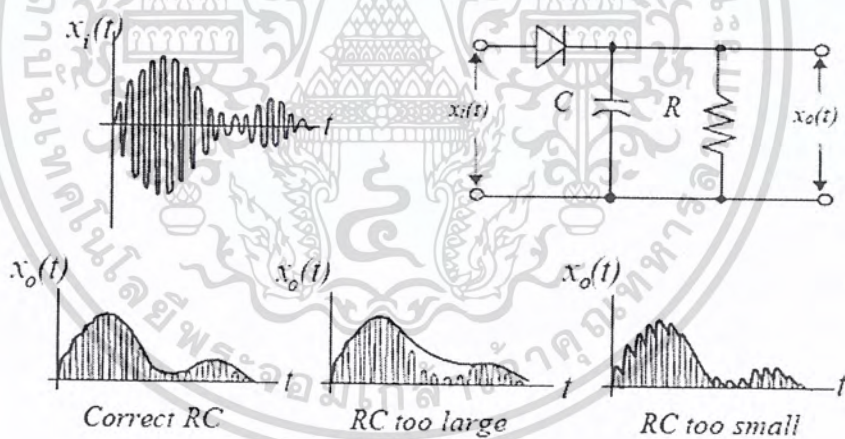
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.6 การดีมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาด (Amplitude demodulations)

ขบวนการที่ได้สัญญาณเดิมกลับคืนมาจากสัญญาณที่มอดูเลตเชิงขนาดนั้นทำได้ 2 แบบ คือ เอนเวลโลปดีเทคชัน (envelope detection) และ ซิงโครนัสดีเทคชัน (synchronous detection)

เอนเวลโลปดีเทคชัน

เอนเวลโลปดีเทคชันเป็นการกรองเอาเอนเวลโลปของสัญญาณ AM เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก ในการสร้างวงจรมาดังแสดงในรูปที่ 2.49 สัญญาณที่มอดูเลตแล้วคือสัญญาณ RF เมื่อผ่านไดโอดแล้วจะถูกตัดเหลือเฉพาะส่วนที่เป็นบวกเมื่อผ่านวงจร RC ทำหน้าที่เป็นฟิลเตอร์แบบความถี่ต่ำผ่านสัญญาณที่ได้ก็จะเป็นสัญญาณ baseband โดยที่ RC ต้องมีค่าเหมาะสม การดีเทคสัญญาณแบบนี้ใช้ได้กับการมอดูเลตแบบที่ส่งพาหะมาด้วยเท่านั้น คือ DSB-LC หรือสัญญาณ AM



รูปที่ 2.49 เอนเวลโลปดีเทคเตอร์

ซิงโครนัสดีเทคชัน

ซิงโครนัสดีเทคชัน ถ้าไม่ได้ส่งพาหะมากับสัญญาณ RF ด้วยการจะได้สัญญาณเดิมกลับคืนมาต้องใช้การคูณสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณเบสแบนด์ขบวนการนี้คล้ายกับการมอดูเลตสัญญาณอีกครั้งคือเมื่อคูณสัญญาณที่มอดูเลตแล้วด้วยพาหะจะทำให้เกิดการย้ายความถี่ไป ดังสมการเมื่อสัญญาณ DSB-SC ถูกคูณด้วยความถี่ ω_c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 x_{DSB}(t)\cos\omega_c t &= x(t)\cos^2\omega_c t \\
 &= \frac{x(t)}{2} + \frac{x(t)}{2}\cos 2\omega_c t
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

ทำฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มจะได้

$$F\{x_{DSB}(t)\cos\omega_c t\} = \frac{X(\omega)}{2} + \frac{X(\omega + 2\omega_c)}{4} + \frac{X(\omega - 2\omega_c)}{4}
 \tag{2.31}$$

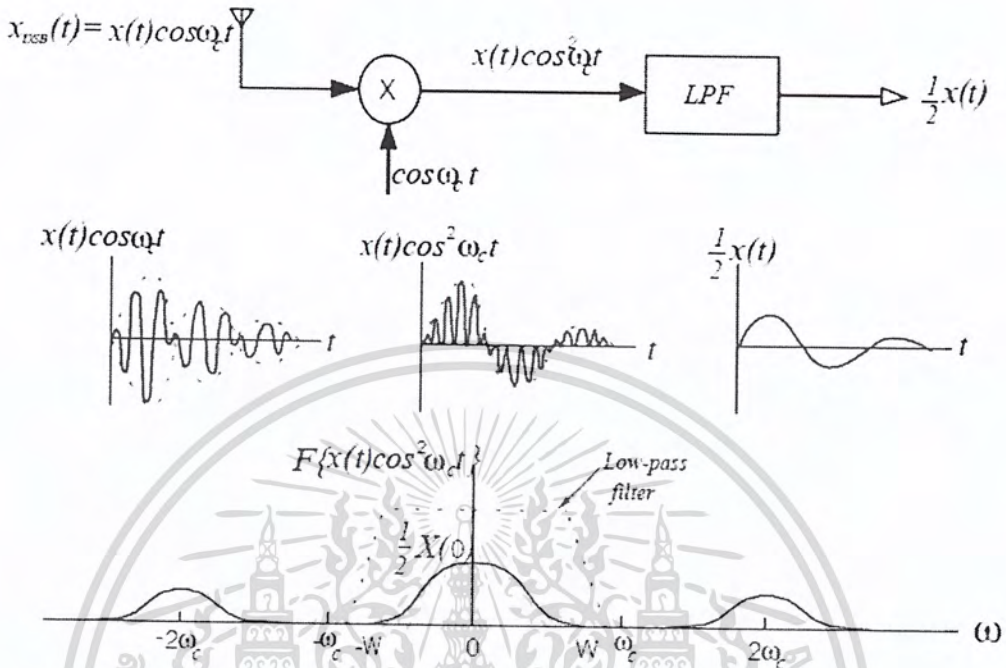
นั่นคือจะได้ $X(\omega)$ ถิ่นมาส่วนสองเทอมหลังมีความถี่อยู่รอบๆความถี่ 2ω จะถูกกรองออกโดยง่าย แต่ถ้าสัญญาณที่นำไปคูณด้วยมีความถี่ และเฟสต่างจะพาหะแล้วจะทำให้ เกิดการผิดเพี้ยนขึ้นได้สมมติว่าสัญญาณมีความถี่ต่างไปเท่ากับ $\Delta\omega$ และเฟสต่างไป θ_0 สมการ 2.29 จะเป็น

$$\begin{aligned}
 x_{DSB}(t)\cos[(\omega_c + \Delta\omega)t + \theta_0] &= x(t)\cos\omega_c t \cos[(\omega_c + \Delta\omega)t + \theta_0] \\
 &= \frac{x(t)\cos(\Delta\omega t + \theta_0)}{2} + \frac{x(t)\cos[(\omega_c + \Delta\omega)t + \theta_0]}{2}
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

แทนที่จะได้ $x(t)$ กลับคืนมาจะได้เป็น

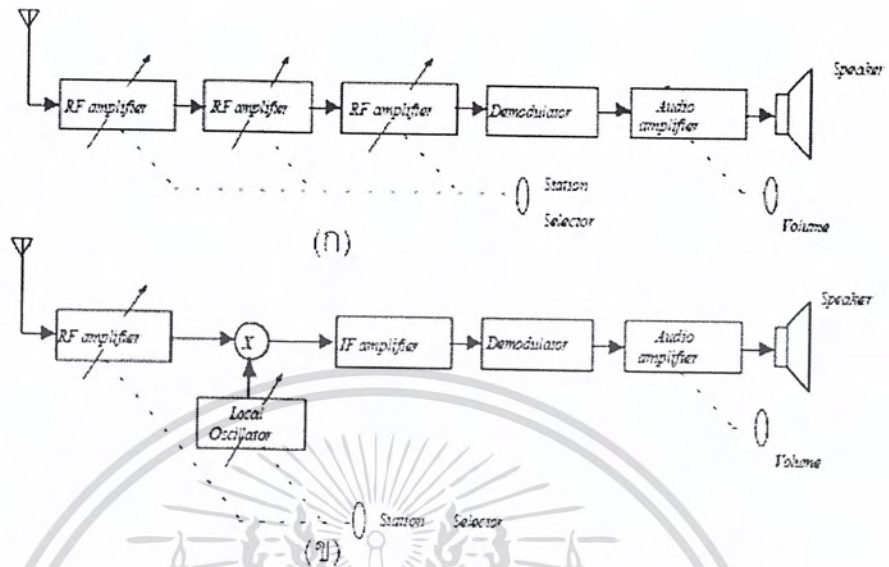
$$x_{err}(t) = \frac{x(t)\cos(\Delta\omega t + \theta_0)}{2}
 \tag{2.33}$$

การจะได้สัญญาณ $x(t)$ กลับคืนมาโดยไม่ผิดเพี้ยนสัญญาณที่ จะนำไปคูณจะต้องมีความถี่ และเฟสตรงกับพาหะ จึงโครนัสตีเทคชัน (synchronous detection) เป็นการสร้างสัญญาณที่ จึงโครนัส กับพาหะ นำไปคูณหรือผสม (mix) กับสัญญาณที่ มอดูเลตแล้วเพื่อให้ ได้ สัญญาณที่ ความถี่ เบสแบนด์ คืนมา เนื่องจากการใช้ สัญญาณที่ เหมือนกับพาหะ บางครั้งจึงเรียกว่า โคฮีเรนต์ ดีเทคชัน (coherent detection) รูปที่ 2.50 แสดงวิธีการนี้



รูปที่ 2.50 การดีมอดูเลตสัญญาณ DSB-SC

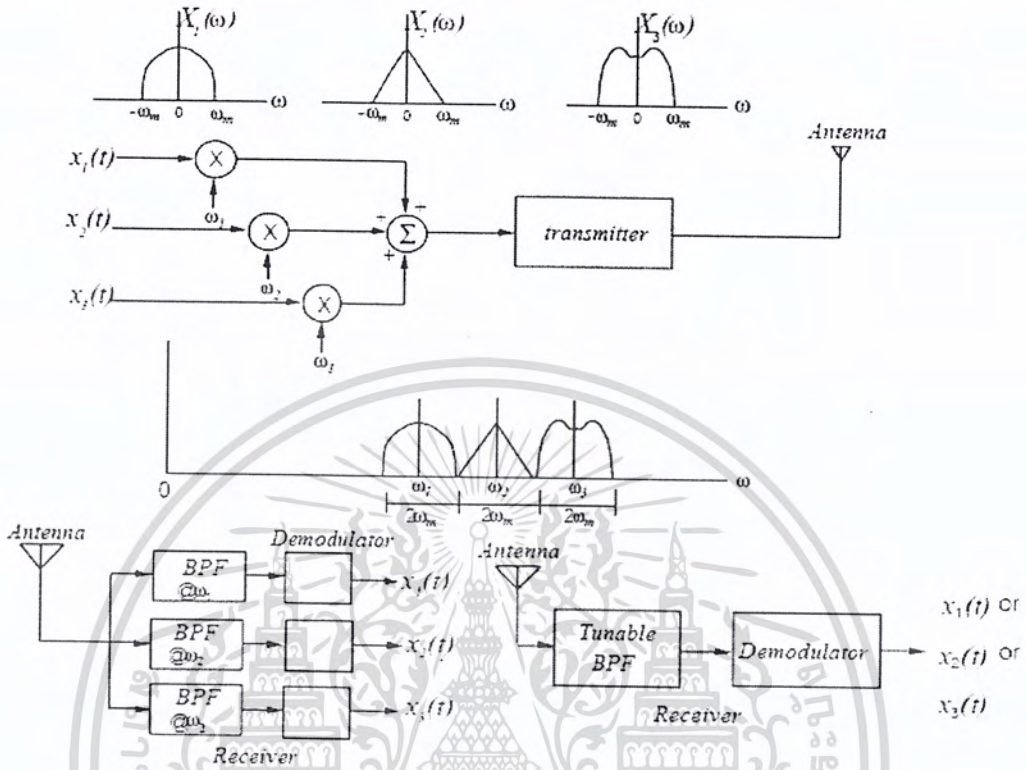
สัญญาณ $\cos \omega_c t$ จะสร้างจากตัวกำเนิดสัญญาณที่เรียกว่า synchronized oscillator ถ้าหากใช้ตัวกำเนิดสัญญาณเพียงตัวเดียวสร้างสัญญาณมีความถี่เท่ากับพาหะจะทำให้ได้สัญญาณเบสแบนด์ในขั้นต้นตอนเดียววิธีการนี้ เรียกว่าเป็นแบบ homodyne ตัวกำเนิดสัญญาณนี้อาจสร้างสัญญาณที่เหมือนพาหะขึ้นจากการนำเอา pilot carrier ที่ส่งมากับสัญญาณ RF ไปใช้ ในการสร้าง แต่ ถ้าใช้ตัวกำเนิดสัญญาณสร้างความถี่ไม่เท่ากับพาหะแต่เมื่อนำไปผสมกับสัญญาณ RF แล้วทำให้ สัญญาณย้ายความถี่ ไปอยู่ที่ความถี่คงที่ค่าหนึ่งเรียกว่าความถี่ IF (intermediate frequency) แล้วจึง demodulate สัญญาณที่อยู่รอบๆ ความถี่ IF นี้ เพื่อให้ ได้ สัญญาณเบสแบนด์ วิธีการผสมสัญญาณทำให้ ได้ ความถี่ IF นี้ เรียกว่า heterodyning เครื่องรับ ที่ ใช้ ระบบนี้ จึงถูกเรียกว่าเป็นแบบ superheterodyne ดังแสดงในรูปที่ 2.51



รูปที่ 2.51 เครื่องรับวิทยุ (ก) แบบ TRF (ข) แบบ Superheterodyne

2.3.1.7 Frequency-Division Multiplexing: FDM

เป็นการส่งสัญญาณหลายๆ สัญญาณไปในช่องสัญญาณเดียวกัน โดยการมอดูเลตแต่ละสัญญาณด้วยพาหะ ที่มีความถี่ต่างกัน สัญญาณที่จะส่งต้องมีแบนด์วิดท์ จำกัดและความถี่พาหะจะต้องห่างกันอย่างน้อยสองเท่าของแบนด์วิดท์ ทางด้านรับอาจเป็นการเล็กรับที่ละสัญญาณดังในวิทยุ กระจายเสียง หรืออาจรับทีเดียวพร้อมกันแล้วนำไปแยกแต่ละสัญญาณออกมารูปที่ 2.52 แสดงระบบ FDM ทั้งสองแบบ



รูปที่ 2.52 การมัลติเพล็กซ์ทางความถี่ (FDM)

2.3.2 การมอดูเลตเชิงมุม (Angle modulations)

ในการมอดูเลตเชิงมุม ขนาดของสัญญาณจะคงที่ ในขณะที่ มุมของพาหะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณที่ต้องการมอดูเลตคือ ω_c ในสมการ 2.33 พิจารณาเฟสเซอร์ ขนาดคงที่ แต่ ให้ มุม $\theta(\omega)$ เปลี่ยน ซึ่งจะเปลี่ยนเนื่องจาก ความถี่ เชิงมุม เปลี่ยน หรือมุมเฟส $\phi(\omega)$ เปลี่ยนความสัมพันธ์ ของความถี่ เชิงมุมกับมุม $\theta(\omega)$ ที่ เวลา t ใดๆ เท่ากับการอินทิเกรตความถี่เชิงมุมตั้งแต่เวลา 0 ถึง t บวกกับมุมเฟสเริ่มต้นดังสมการ 2.34

$$\theta(t) = \int_0^t \omega_i(t) dt + \theta_0 \tag{2.34}$$

θ_0 คือ มุมของพาหะ ณ เวลาใดๆ และ

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta}{dt} \tag{2.35}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\omega_i(t)$ เป็นความถี่เชิงมุม ณ เวลาใดๆ สิ่งที่เป็นไปได้ในการมอดูเลตเชิงมุมคือ

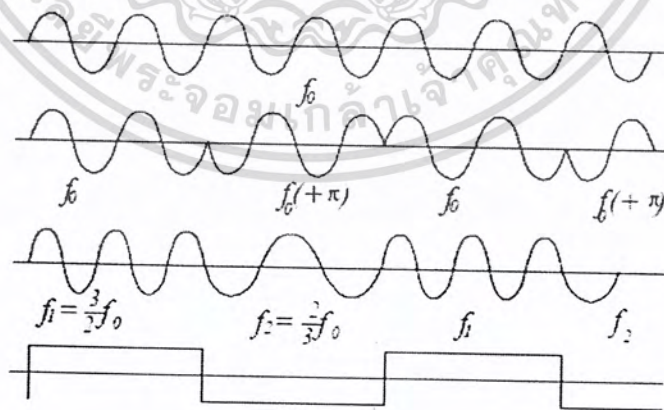
1. การเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสตามสัญญาณที่ ต้องการมอดูเลตเรียกว่า phase modulation (PM)

$$\begin{aligned} \theta(t) &\propto x(t) \\ \theta(t) &= \omega_c t + k_p x(t) + \theta_0 \\ x_{PM}(t) &= A \cos[\omega_c t + k_p x(t) + \theta_0] \end{aligned} \tag{2.36}$$

2. การเปลี่ยนแปลงของความถี่เชิงมุมตามสัญญาณที่ ต้องการมอดูเลตเรียกว่า frequency modulation (FM)

$$\begin{aligned} \omega_i(t) &\propto x(t) \\ \omega_i(t) &= \omega_c + k_f x(t) \\ \theta(t) &= \omega_c t + \int k_f x(t) dt + \theta_0 \\ x_{FM}(t) &= A \cos[\omega_c t + \int k_f x(t) dt + \theta_0] \end{aligned} \tag{2.37}$$

สัญญาณ FM และ PM แสดงในรูปที่ 2.53 k_p, k_f เรียกว่า modulation sensitivity มีหน่วย $\text{rads-V}^{-1}, \text{kHz mV}^{-1}$ ตามลำดับลักษณะการมอดูเลตแบบ FM และ PM นี้คล้ายกันมากในที่นี้ จะกล่าวถึงแบบ FM ในรายละเอียดก่อน ส่วน PM ก็ จะคล้ายกันซึ่งจะได้กล่าวถึงในภายหลัง



รูปที่ 2.53 สัญญาณ PM และ FM เมื่อมอดูเลตด้วยสัญญาณสี่เหลี่ยม

2.3.2.1 การมอดูเลตแบบ FM (Frequency Modulation)

ให้ สัญญาณที่ต้องการมอดูเลตเป็น

$$x_m(t) = A_m \cos \omega_m t \quad (2.38)$$

แทนค่าในสมการ 2.37

$$\begin{aligned} x_{FM}(t) &= A \cos \left[\omega_c t + \int k_f A_m \cos \omega_m t dt \right] \\ &= A \cos \left[\omega_c t + \frac{\Delta \omega}{\omega_m} \sin \omega_m t \right] \\ x_{FM}(t) &= A \cos \left[\omega_c t + \beta \sin \omega_m t \right] \end{aligned} \quad (2.39)$$

โดยที่ $\Delta \omega = k A_m$ เป็นการเปลี่ยนแปลงความถี่ เข็มมุดสูงสุด และ $\beta = \frac{\Delta \omega}{\omega_m}$ เรียกว่า modulation index จากสมการ 2.39 สามารถเขียนได้เป็น

$$x_{FM}(t) = A \cos \omega_c t \cos(\beta \sin \omega_m t) - A \sin \omega_c t \sin(\beta \sin \omega_m t) \quad (2.40)$$

ซึ่งจะพบว่า การวิเคราะห์ทางความถี่นั้นไม่เป็นรูปแบบง่ายๆ เหมือนการมอดูเลตแบบ AM แล้วกล่าวคือเป็นการมอดูเลตที่ไม่เป็นเชิงเส้นไม่สามารถใช้วิธีการ superposition ได้

Narrow-band Frequency Modulation (NBFM)

ในกรณี ที่ β มีค่าน้อย ($\beta < 0.2$) ทำให้สามารถประมาณค่า

$$\begin{aligned} \cos(\beta \sin \omega_m t) &\approx 1 \\ \sin(\beta \sin \omega_m t) &\approx \beta \sin \omega_m t \end{aligned} \quad (2.40)$$

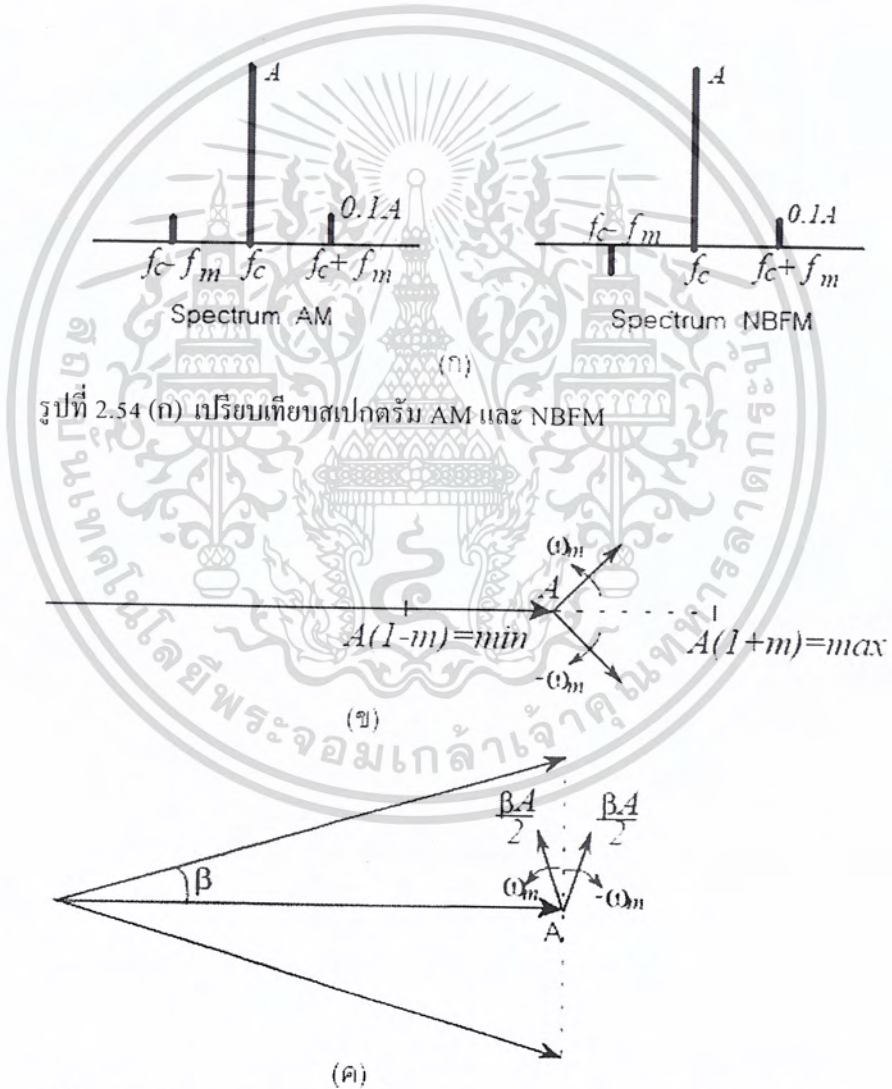
สมการ FM จะเขียนได้เป็น

$$x_{FM}(t) = A \cos \omega_c t - A \beta \sin \omega_c t \sin \omega_m t$$

จะได้

$$x_{FM}(t) = A \cos \omega_c t - \frac{1}{2} \beta A \cos(\omega_c - \omega_m)t + \frac{1}{2} \beta A \cos(\omega_c + \omega_m)t \quad (2.41)$$

จะเห็นว่าเมื่อวิเคราะห์ดูแล้วจะพบว่ามิลักษณะคล้ายกับสัญญาณ AM กล่าวคือสเปกตรัมจะเป็นพัลส์ที่มีความถี่ $f_c - f_m$ และ $f_c + f_m$ และเฟสเซอร์ ไดอะแกรมแสดงในรูปที่ 2.54 สำหรับสัญญาณ AM เป็นการรวมกันระหว่าง สัญญาณที่ต้องการมอดูเลตกับพาหะด้วยเฟสตรงกัน ส่วนสัญญาณ NBFM จะรวมกันด้วยมุมที่แตกต่างกันของ สัญญาณทั้งสอง



รูปที่ 2.54 (ต่อ) (ข) เฟสเซอร์ ไดอะแกรมของ AM (ค) เฟสเซอร์ ไดอะแกรมของ NBFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NBFM bandwidth

จากสเปกตรัมของสัญญาณ NBFM พบว่ามี แบนด์วิดท์ B fm = 2 เป็นการมอดูเลต สัญญาณแบบ FM ที่มีแบนด์วิดท์แคบด้วยข้อจำกัดที่ $\beta < 0.2$ ทำให้ง่ายแก่การวิเคราะห์และการสร้าง เนื่องจากมี ลักษณะคล้ายสัญญาณ AM

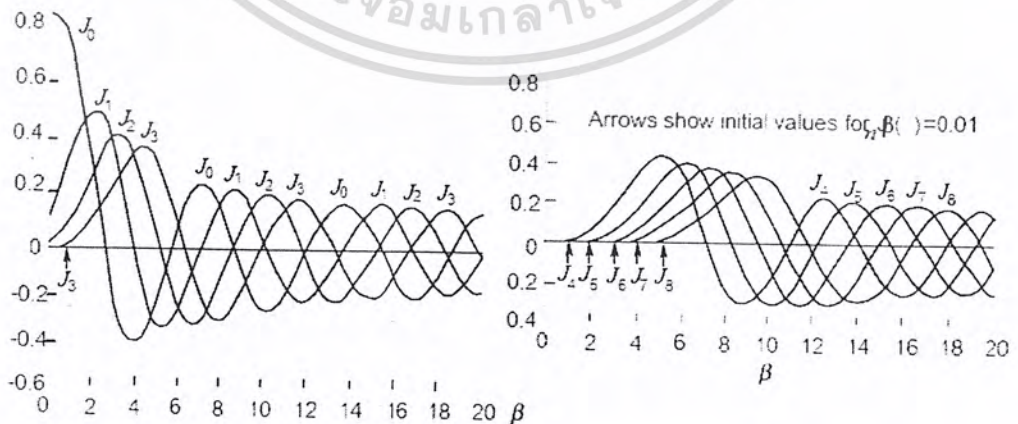
Wide-band Frequency Modulation (WBFM)

ในกรณี ที่ มากกว่า 0.2 ขึ้นไปจะไม่สามารถ ประมาณค่าดังสมการ 2.41 ได้ แต่สามารถกระจายเป็นอนุกรมของเบสเซลฟังก์ชันได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \cos(\beta \sin \omega_m t) &= J_0(\beta) + 2J_2(\beta) \cos 2\omega_m t + 2J_4(\beta) \cos 4\omega_m t + \dots \\
 \sin(\beta \sin \omega_m t) &= 2J_1(\beta) \sin \omega_m t + 2J_3(\beta) \sin 3\omega_m t + 2J_5(\beta) \sin 5\omega_m t + \dots
 \end{aligned}$$

(2.42)

โดยที่ $J_n(\beta)$ เป็นเบสเซลฟังก์ชัน (Bessel function) อันดับที่ n ของ β เป็นฟังก์ชันที่มักจะพบในการแก้ปัญหาทางฟิสิกส์ฟังก์ชันนี้จะมีค่าเป็นตารางและรูปภาพดังแสดงในรูปที่ 2.55 จะเห็นว่าเป็นฟังก์ชันที่มีการเปลี่ยนแปลง เป็นคาบและลดลงเมื่อ β มากขึ้น โดย จะมีค่าเริ่มต้นที่ 0 ยกเว้น J_0 เริ่มที่ค่า 1



รูปที่ 2.55 เบสเซลฟังก์ชันที่ค่า β และ n ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

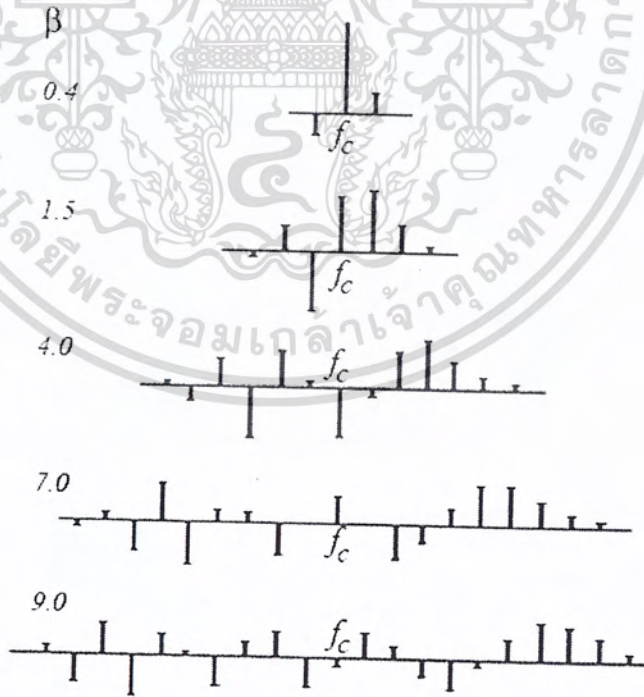
จากการแทนค่าด้วยอนุกรมของเบสเซลฟังก์ชันนี้จะทำให้ได้ สัญญาณ FM โดยแทนค่าในสมการ 2.40 จะได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 x_{FM} &= A \cos \omega_c t [J_0(\beta) + 2J_2(\beta) \cos 2\omega_m t + 2J_4(\beta) \cos 4\omega_m t + \dots] \\
 &\quad - A \sin \omega_c t [J_1(\beta) \sin \omega_m t + 2J_3(\beta) \sin 3\omega_m t + 2J_5(\beta) \sin 5\omega_m t + \dots] \\
 &= J_0(\beta) A \cos \omega_c t + 2J_2(\beta) A \cos \omega_c t \cos 2\omega_m t + 2J_4(\beta) A \cos \omega_c t \cos 2\omega_m t \\
 &\quad - 2J_1(\beta) A \sin \omega_c t \sin \omega_m t - 2J_3(\beta) A \sin \omega_c t \sin 3\omega_m t - 2J_5(\beta) A \sin \omega_c t \sin 5\omega_m t
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_{WBFM} &= \dots - J_3(\beta) A \cos(\omega_c - 3\omega_m)t + 2J_2(\beta) A \cos(\omega_c - 2\omega_m)t \\
 &\quad - J_1(\beta) A \cos(\omega_c - \omega_m)t + J_0(\beta) A \cos \omega_c t + J_1(\beta) A \cos(\omega_c + \omega_m)t \\
 &\quad + J_2(\beta) A \cos(\omega_c + 2\omega_m)t + J_3(\beta) A \cos(\omega_c + 3\omega_m)t + \dots
 \end{aligned}$$

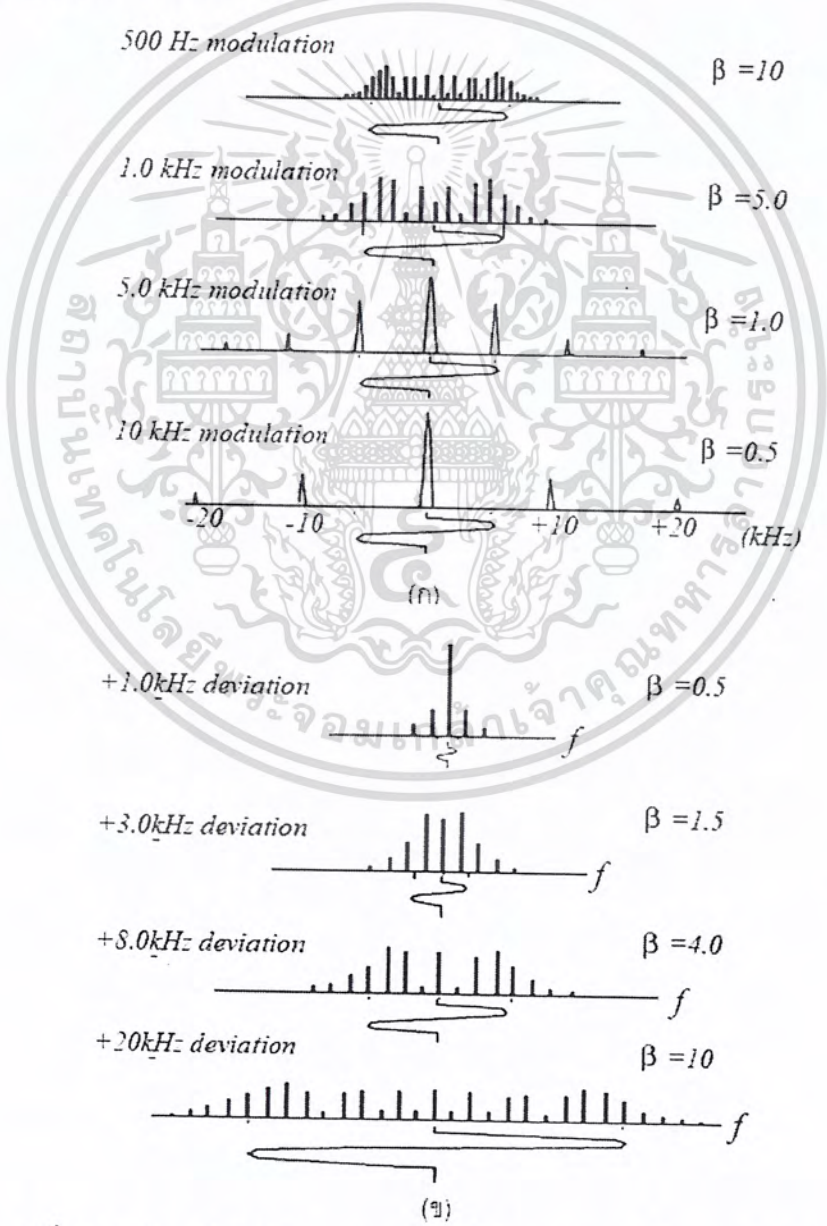
(2.43)

ในกรณี ของ WBFM จะต่างจาก NBFM กล่าวคือจะมี sideband มากกว่าหนึ่งคู่ ดังสเปกตรัมแสดงในรูปที่ 2.56 เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีระยะห่างเท่ากับ f_m มีการกระจายออกทั้งสองข้างเท่านั้นแต่ค่าจะมีทั้งบวกและลบ



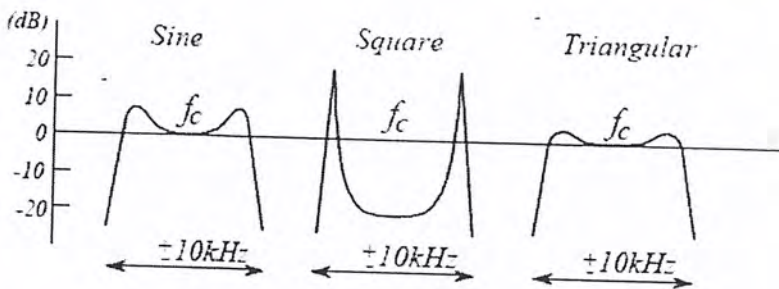
รูปที่ 2.56 เส้นสเปกตรัมสัญญาณ FM ที่ ค่าต่างๆ

เมื่อพิจารณาขนาดของสเปกตรัมของ WBFM นี้ โดยแบ่งเป็นสองกรณี คือ Δf คงที่ และ f_m คงที่ ดังแสดงใน รูปที่ 2.57 จะเห็นความสัมพันธ์ ระหว่าง β , Δf , f_m จะเห็นว่าที่ β มี ค่าน้อยๆ สเปกตรัมจะคล้าย AM ก็มีพาหะ เห็นได้ชัดเจนในขณะที่ β สูงขึ้นสเปกตรัมจะกระจายออกทั้งสองข้างสมมาตรกันพาหะจะมี ขนาดเล็กลงไป อาจ เป็นศูนย์ ที่ β บางค่าได้ และรูปแบบของขนาดสเปกตรัมที่ การกระจายออกนั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณที่นำมามอดูเลต ในรูปที่ 2.58 แสดงรูปแบบของขนาดสเปกตรัมของสัญญาณ WBFM เมื่อสัญญาณที่นำมามอดูเลต เป็นสัญญาณชายน้สัญญาณสี่เหลี่ยม และสัญญาณสามเหลี่ยม



รูปที่ 2.57 เส้นสเปกตรัมสัญญาณ FM ที่ β ค่าต่างๆ (ก) Δf คงที่ \pm (5kHz) (ข) f_m คงที่ (2kHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Carrier 22kHz Baseband 600 Hz

รูปที่ 2.58 รูปแบบสเปกตรัมเมื่อมอดูเลตด้วยสัญญาณต่างกัน

WBFM bandwidth

จากรูปสเปกตรัมสัญญาณ WBFM จะเห็นว่าจุดตัดของแบนด์วิดท์ไม่ชัดเจน เหมือนของ AM หรือ NBFM แต่เมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าขนาดของสเปกตรัมจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ความถี่เปลี่ยน จากความถี่ พาหะมากกว่า $\pm\Delta f$ จึงอาจกล่าวได้ว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณ WBFM มีค่าเท่ากับ $2\Delta f$ ได้ แต่ โดยทั่วไปจะมีการนิยามที่ดีกว่านี้คือ ช่วงความถี่ ที่ ผ่าน 98% กำลังของสัญญาณเรียกว่าเป็น แบนด์วิดท์ของคาร์สัน (carson bandwidth) ในการนี้ จะต้องมี เส้นสเปกตรัมเป็นจำนวน $2(\beta + 1)$ เส้นอยู่ในแบนด์วิดท์ นี้เสมอ และ เนื่องจากแต่ละเส้นสเปกตรัมห่างกัน f_m จะได้แบนด์วิดท์

$$B = 2(\beta + 1)f_m = 2(\Delta f + f_m) \tag{2.44}$$

ยังมีนิยามแบนด์วิดท์ของ WBFM อีกแบบคือ 1% bandwidth คือแบนด์วิดท์ ที่ขนาดของสเปกตรัมลดลงไปเป็น 1% ของเส้นสเปกตรัมที่สูงที่สุดซึ่งจะกว้างกว่าแบนด์วิดท์ของคาร์สัน

2.3.2.2 การมอดูเลตแบบ PM (Phase modulation)

คล้ายการมอดูเลตแบบ FM มากในกรณีที่สัญญาณที่ต้องการมอดูเลตเป็น $A \cos \omega_m t$ สัญญาณ PM จะเป็น

$$\begin{aligned} x_{PM}(t) &= A \cos(\omega_c t + k_p A_m \cos \omega_m t) \\ &= A \cos(\omega_c t + \beta_p \cos \omega_m t) \end{aligned} \tag{2.45}$$

โดยที่ β_p เรียกว่า phase modulation index และเช่นเดียวกับ FM จะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสสูงสุด (maximum phase deviation, $\Delta\phi$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta\phi = \beta_p = k_p A_m$$

สัญญาณ PM จะเขียนได้ ในรูปทั่วไปเมื่อสัญญาณที่นำมามอดูเลตเป็น $\cos \omega_m t$

$$x_{PM}(t) = A \left[\cos \omega_c t \cos(\beta_p \cos \omega_m t) - \sin \omega_c t \sin(\beta_p \cos \omega_m t) \right] \quad (2.46)$$

ซึ่งแยกพิจารณาได้เช่นเดียวกับ FM ถือเป็น NBPM และ WBFM

Narrow-band Phase Modulation (NBPM)

ในเงื่อนไข $\beta_p \leq 0.2 (\Delta\phi < 11^\circ)$ จะได้

$$x_{PM}(t) = A \cos \omega_c t + \frac{1}{2} \beta_p A \left\{ \cos \left[(\omega_c - \omega_m) t + \frac{\pi}{2} \right] + \cos \left[(\omega_c + \omega_m) t + \frac{\pi}{2} \right] \right\} \quad (2.47)$$

เช่นเดียวกับ NBFM ต่างกันที่ NBPM sideband จะมี phase shift ไป $\pi/2$ (2.48) เช่นเดียวกับ WBFM ต่างกันที่เฟสเท่านั้น

2.3.2.3 การสร้างสัญญาณ FM, PM

การสร้างโดยตรงเนื่องจากการมอดูเลตแบบ FM คือการเปลี่ยนแปลงความถี่ของพาหะตาม สัญญาณที่ต้องการ

มอดูเลตวงจรมอดูเลตก็จะต้องมีคุณสมบัติคือกำเนิดความถี่ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ซึ่งจะทำได้หลายวิธี

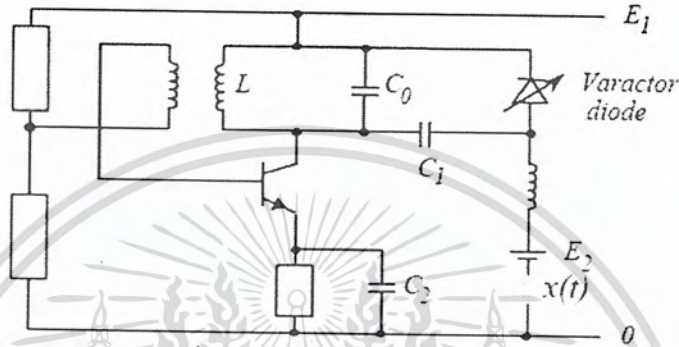
1. Varactor tuner circuit จากวงจรนี้ จะได้ความถี่ขาออกของวงจรเป็น

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.48)$$

ถ้า L หรือ C มี ค่าเปลี่ยนไป f_c จะมี ค่าเปลี่ยนตามเป็นสัดส่วนกัน โดยที่การเปลี่ยนแปลงมีค่าไม่มากเมื่อเทียบกับค่า L หรือ C เดิมการที่จะเปลี่ยนค่า C ตามสัญญาณที่ต้องการมอดูเลตนั้น มีอุปกรณ์ตัวหนึ่งซึ่งเรียกว่า varactor diode (variable reactor) มี ค่า C ที่รอยต่อ (junction capacitance)

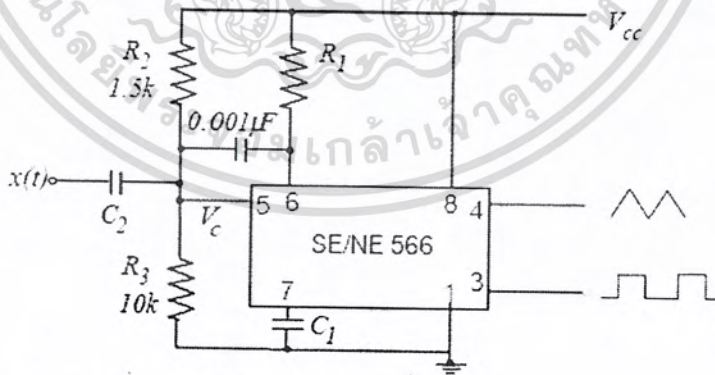
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปรตามแรงดันไบอัสกลับ (reverse bias) ดังนั้นเมื่อ ใช้ varactor นี้ ในวงจร tune แล้วปี อนุสัญญาเป็นแรงดันที่ varactor นี้ ความถี่ขาออกก็จะเปลี่ยนตามสัญญาที่ ป้อนเข้าไปได้วงจร ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.59



รูปที่ 2.59 วงจรสร้างควมถี่ พาหะ โดยใช้ varactor

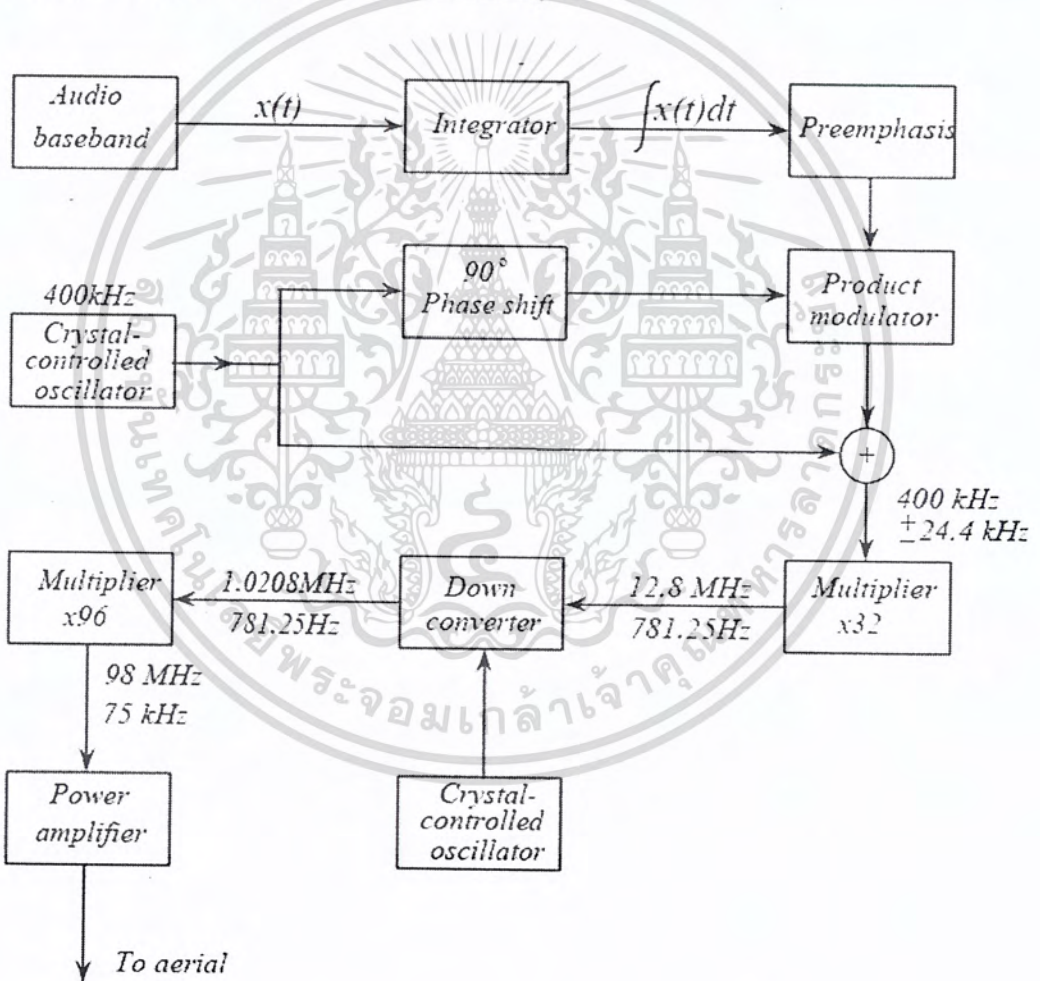
2. VCO (Voltage control oscillator) เป็นวงจรกำเนิดความถี่ที่สามารถควบคุมความถี่ ได้ ด้วยแรงดัน โดยใช้หลักการของการ charge และ discharge ของ C เช่นเดียวกับวงจร multivibrator อัตราการ charge และ discharge จะขึ้นอยู่กับค่า R, C และแรงดันอ้างอิง เมื่อเลือกค่า R, C คงที่ ค่าหนึ่งจะได้ความถี่ f_c ค่าหนึ่งเมื่อมอดูเลต ตัวอย่าง IC และวงจรแสดงในรูปที่ 2.60



รูปที่ 2.60 วงจรมอดูเลตที่ใช้ VCO (IC 566)

การสร้างโดยทางอ้อมจากสัญญาณ NBFM ที่มีลักษณะคล้ายสัญญาณ AM

การสร้างโดยทางอ้อมจากสัญญาณ NBFM ที่มีลักษณะคล้ายสัญญาณ AM นั้นสามารถใช้การมอดูเลตแบบ AM จะได้สัญญาณ NBFM มีค่าต่ำก่อนแล้วจึงคูณสัญญาณให้มีค่าสูงขึ้นซึ่งทำให้ความถี่สูงตามไปด้วยจากนั้นจึงเลื่อนความถี่ลงโดยวิธีการที่เรียกว่า down conversion การทำงานในลักษณะนี้เราเรียกว่า the Armstrong method ด้วยวิธีการนี้ จะได้สัญญาณ WBFM ที่มี stability ดี กว่าบล็อกไดอะแกรมของวงจรแสดงในรูปที่ 2.61



รูปที่ 2.61 Armstrong Modulator สำหรับความถี่ VHF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

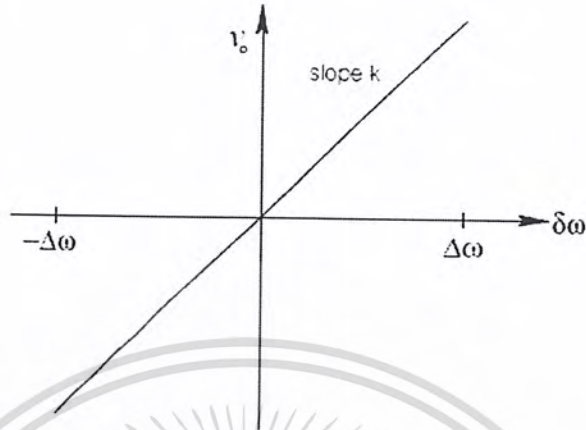
2.3.2.4 การดีเทคสัญญาณ FM (FM detectors)

เนื่องจากสัญญาณ FM ได้ จากการเปลี่ยนความถี่ ตามขนาดสัญญาณที่นำมามอดูเลตเมื่อต้องการดีมอดูเลตหรือดีเทค สัญญาณกลับคืนมาก็ อาจใช้ วิธีการกลับกัน คือใช้ วงจรที่ เปลี่ยนขนาดสัญญาณขาออกตามความถี่ของสัญญาณขา เข้าก็ จะได้สัญญาณที่มีขนาดเปลี่ยนไปคือ สัญญาณ AM นั่นเองจากนั้น จึงใช้เอ็นเวล โลปดีเทคเตอร์ นำสัญญาณ เบสแบนด์ ออกมาได้ นั่นก็คือการดีเทคโดยการเปลี่ยนสัญญาณ FM เป็นสัญญาณ AM ก่อนส่วนอีกลักษณะคือการได้สัญญาณ เดิมกลับออกมาโดยตรงอาจใช้ zero crossing detector หรือการดีเทค โดยใช้เฟสล็อกคูล

การดีเทคโดยการเปลี่ยนเป็นสัญญาณ AM

ตัวที่ จะเปลี่ยนการเปลี่ยนแปลงของความถี่ ของ สัญญาณ FM ไปเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดนั้น จะต้องใช้การตอบสนองแต่ละความถี่ ที่ไม่เท่ากันแต่ เป็นเชิงเส้นดัง แสดงในรูปที่ 2.62 ซึ่งเราเรียก วิธีการเช่นนี้ ว่า discriminator action จะเห็นว่าที่ความถี่ มี การตอบสนองเท่ากับ ศูนย์ ที่ ความถี่ สูงขึ้นการตอบสนองจะเพิ่มขึ้น นั่นคือสัญญาณขาออกจะมีขนาดสูงขึ้นขณะที่ ความถี่ ต่ำลงการ ตอบสนองนี้ อยลงขนาดของสัญญาณขาออกจะต่ำลงผลที่ได้คือสัญญาณ AM เมื่อผ่านเอ็นเวล โลปดีเทคเตอร์ ก็ จะได้สัญญาณเบสแบนด์กลับคืนมา วงจรที่ ใช้หลักการ discriminator นั้น สร้างได้หลายแบบ คือ

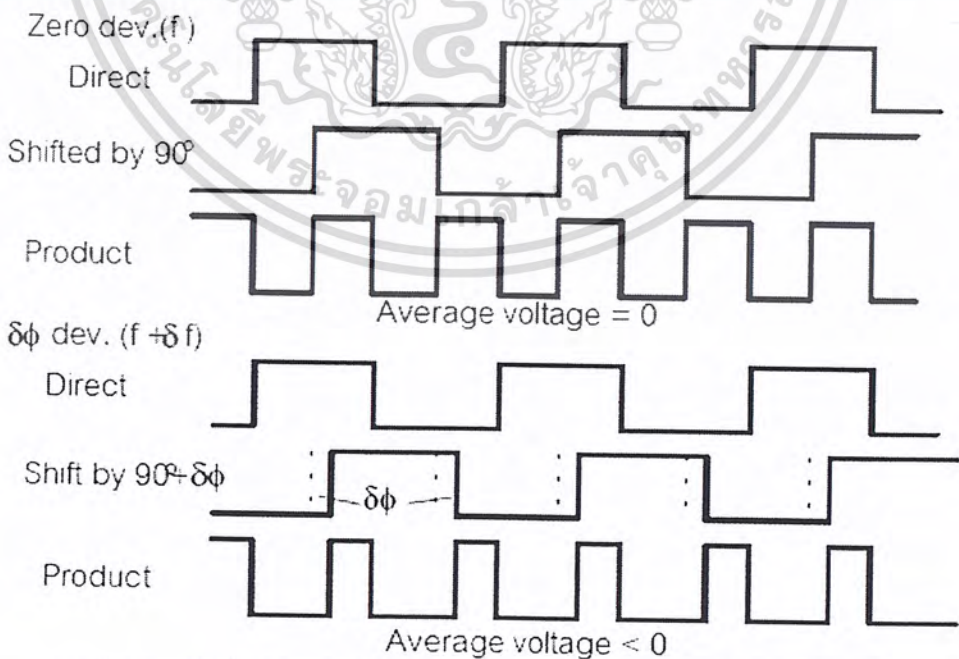
1. Differentiating circuit
2. Tune circuit
3. Raito detector
4. Quadrature detector



รูปที่ 2.62 Discriminator Action

Zero crossing detection

ใช้หลักการที่สัญญาณต้องมีการตัดผ่านจุดศูนย์ ทูกรอบของสัญญาณอัตราผ่านจุดศูนย์ก็คือความถี่ของสัญญาณนั่นเอง ถ้าความถี่สูงขึ้น การตัดผ่านจุดศูนย์จะมากขึ้น ในเวลาหนึ่งเพื่อความเข้าใจพิจารณารูปที่ 2.63 สัญญาณที่ได้จะมีคาบเท่ากันแต่ความกว้างของพัลส์จะเปลี่ยนไปตามความถี่ และ เมื่อเฉลี่ยแล้วจะได้เป็นระดับของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่

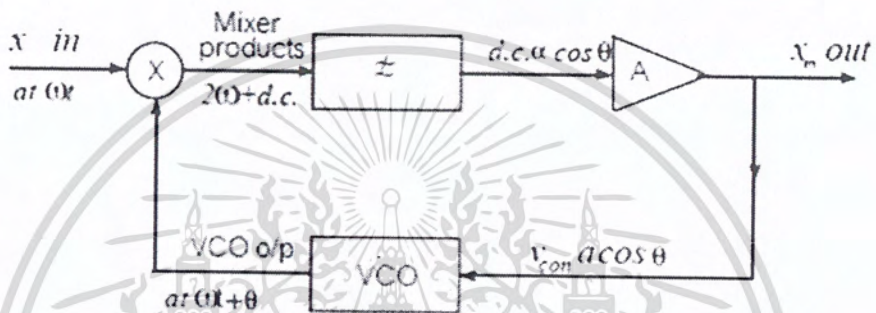


รูปที่ 2.63 รูปคลื่นแสดงการเปรียบเทียบเฟส ค่าเฉลี่ยของผลคูณสัญญาณจะแปรตามการเปลี่ยนแปลงเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตีเทคโดยเฟสล็อกคูล (Phase lock loop)

เป็นวงจรที่ lock VCO โดยการป้อนกลับด้วยผลต่าง เฟสของสัญญาณที่ เข้ามาการเปลี่ยนแปลงของเฟสนี้ทำให้ ได้สัญญาณขาออกที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดตาม ความถี่ บล็อกไดอะแกรมแสดงในรูปที่ 2.64



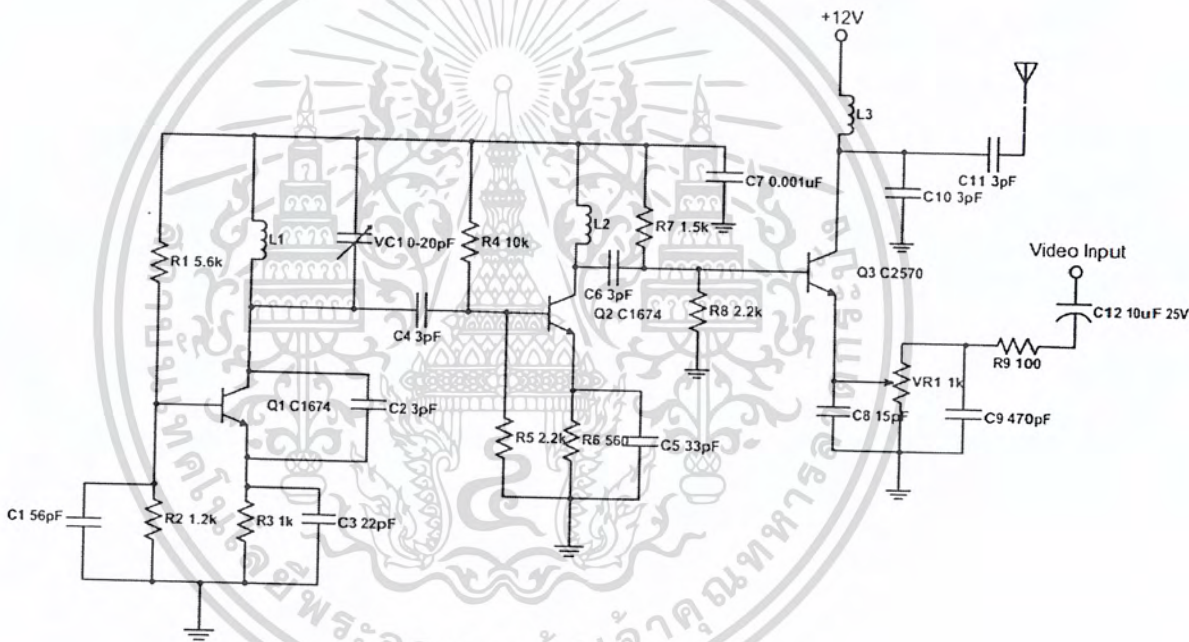
รูปที่ 2.64 วงจร Phase-locked loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์

3.1 วงจรส่งสัญญาณวิดีโอ

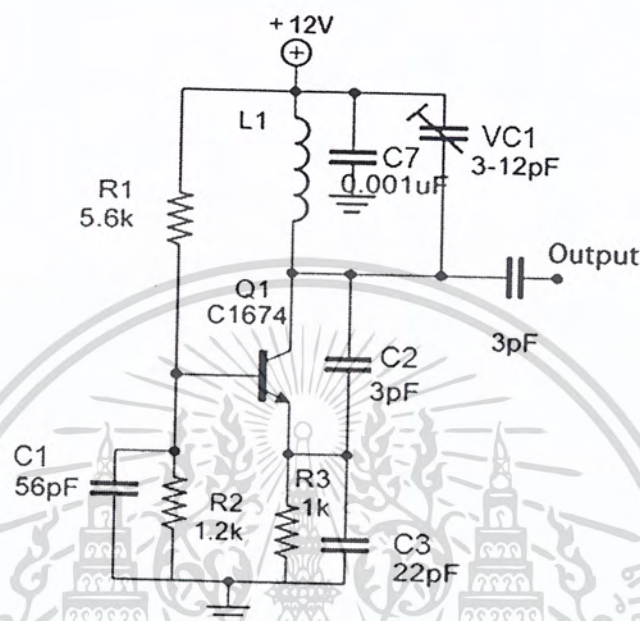


รูปที่ 3.1 วงจรส่งสัญญาณวิดีโอ

การทำงานของเครื่องส่งสัญญาณวิดีโอแบบไร้สายประกอบด้วย 3 ส่วน คือส่วนแรกเป็นส่วนวงจรกำเนิดความถี่ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณคลื่นพาห์เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณ จากนั้นจะผ่านเข้าสู่วงจรขยายสัญญาณเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียกำลังงาน จากนั้นจะทำการส่งไปยังวงจรมอดูเลตเพื่อทำการมอดูเลตสัญญาณคลื่นพาห์เข้ากับสัญญาณวิดีโอเพื่อทำการส่งสัญญาณออกทางสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 วงจรกำเนิดความถี่แบบ LC



รูปที่ 3.2 วงจรกำเนิดความถี่แบบ LC

วงจรถ่ายความถี่หรืออาจจะเรียกว่าวงจรรอสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ นำพา สัญญาณข่าวสาร จากเครื่องส่ง ไปยังเครื่องรับ หรือเราเรียกว่า คลื่นพาห์ RF (RF- Carrier) วงจรกำเนิดความถี่ หรือวงจรรอสซิลเลเตอร์ จัดเป็นวงจรขยายสัญญาณอีกแบบหนึ่ง ที่อาศัยการป้อนกลับจากเอาต์พุต มายังอินพุต ซึ่งจะทำการกำเนิดสัญญาณได้ โดยไม่จำเป็นต้องป้อนสัญญาณใดๆ เข้าที่อินพุตวงจรรอสซิลเลเตอร์แบบ LC ชนิดควอด-เบส โคลทิตด์ โดยมีขดลวด L1 กับทรินเมอร์ VC1 ประกอบกันเป็นวงจรปรับทางด้านเอาต์พุตเพื่อสร้างความถี่ของคลื่นพาห์ โดยมี R1 R2 R3 เป็นวงจรไบอัสให้กับ Q1 และ C1 ทำหน้าที่บายพาสความถี่สูงที่ขาเบสและ C2 กับ C3 เป็นตัวแบ่งแรงดันกำหนดอัตราส่วนของสัญญาณที่จะทำการป้อนกลับจากคอลเลคเตอร์มายังอิมิเตอร์ ดังนั้น C3 จึงไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุบายพาสเหมือนของวงจร โดยทั่วไป

ความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์หาได้จาก

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \left(\frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} + VC_1 \right)}} \quad (3.1)$$

เมื่อแทนค่า $C_2 = 3\text{pF}$, $C_3 = 22\text{pF}$, $VC_1 = 0 - 20\text{pF}$ และ $L_1 = 0.0167 \times 10^{-9}$ แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ 3.1 จะได้ความถี่ออกมาประมาณ 81.85-203.62 MHz

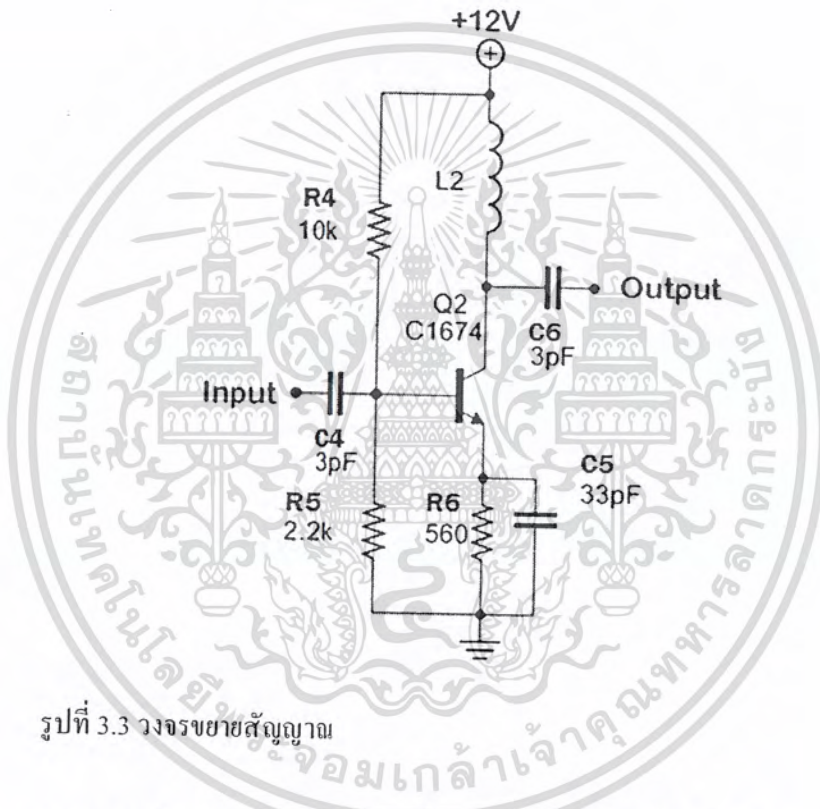
ตารางที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อปรับเปลี่ยนค่า VC_1 คำนวณได้จากสูตร

$VC_1(\text{pF})$	ความถี่จากการคำนวณ (MHz)
1	203.62
2	180.80
3	163.99
4	151.13
5	140.90
6	132.49
7	125.43
8	119.39
9	114.15
10	109.54
11	105.45
12	101.78
13	98.47
14	95.47
15	92.72
16	90.20
17	87.88
18	85.72
19	83.72
20	81.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 วงจรขยายสัญญาณ

วงจรขยายกำลังความถี่สูงเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่มีขนาดของกระแสและขนาดของแรงดันสูงๆ เพื่อป้อนให้กับโหลด (สายอากาศ) ของเครื่องส่ง เพื่อแพร่กระจายคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศหรืออากาศว่าง ไปยังเครื่องรับ



รูปที่ 3.3 วงจรขยายสัญญาณ

วงจรขยายสัญญาณจะขยายสัญญาณที่มาจากวงจรกำเนิดความถี่ให้มีความแรงขึ้นมาเพียงพอที่จะนำไปมอดูเลตกับสัญญาณภาพได้โดยการทำงานของวงจรเริ่มจากสัญญาณผ่านตัวเก็บประจุคัปปลิง C_4 ไปยัง Q_2 โดยมี R_4 , R_5 ทำหน้าที่เป็นความต้านทานไบแอสที่ขาเบสและมี C_5 เป็นตัวเก็บประจุลงกราวด์เพื่อป้องกันการเกิดการสูญเสียกำลังงานที่ R_6 ซึ่งต่อไว้เพื่อปรับเสถียรภาพของวงจรส่วน L_2 จะเป็น RF Chock ซึ่งเป็นตัวป้องกันสัญญาณจากเอาต์พุตที่ขาคอลเลคเตอร์ไม่ให้เข้าไปปนกับไฟเลี้ยงของวงจรเมื่อทำการแทนค่าตัวแปรต่างๆของวงจรเพื่อหาอัตราขยายของวงจรขยายจะได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{th} = R_4 // R_5 \quad (3.2)$$

$$R_{th} = 10k\Omega // 2.2k\Omega = 1.8k\Omega$$

$$E_{th} = \frac{R_5 V_{CC}}{R_4 + R_5} \quad (3.3)$$

$$E_{th} = \frac{2.2k\Omega \times 12V}{10k\Omega + 2.2k\Omega} = 2.164V$$

$$I_B = \frac{E_{th} - V_{BE}}{R_{th} + (\beta + 1)R_E} \quad (3.4)$$

$$I_B = \frac{2.164V - 0.7V}{1.8k\Omega + (70 + 1)560\Omega} = 35.23\mu A$$

$$I_C = \beta I_B \quad (3.5)$$

$$I_C = 70 \times 35.23\mu A = 2.47mA$$

$$I_E = I_B + I_C \quad (3.6)$$

$$I_E = 35.23\mu A + 2.74mA = 2.77mA$$

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_C}{r_e} = \frac{\omega L_2}{r_e} \quad (3.7)$$

$$r_e = \frac{25mV}{I_E} \quad (3.8)$$

$$r_e = \frac{25mV}{2.77mA} = 9.025\Omega$$

$$A_V = -\frac{\omega L_2}{r_e} \quad (3.9)$$

$$A_V = -\frac{2\pi \times 150 \times 10^6 \times 0.01248 \times 10^{-6}}{9.025}$$

$$A_V = -1.303$$

ดังนั้น อัตราขยายจะได้เป็น 3 เท่าเครื่องหมายลบหมายถึงเฟสต่างกัน 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 วงจรมอดูเลตทางแอมพลิจูด

วงจรมอดูเลตทางแอมพลิจูด (AM Modulation) ทำหน้าที่ในการมอดูเลตสัญญาณคลื่นพาห์ที่สร้างจากวงจรกำเนิดสัญญาณเข้ากับสัญญาณวิดีโอ วงจรมอดูเลตทางแอมพลิจูดที่ใช้เป็นแบบ DSB-SC ซึ่งในกระบวนการมอดูเลตทางแอมพลิจูดนั้นขนาดของสัญญาณข่าวสารจะถูกใช้ไปบังคับค่าแอมพลิจูด A_c ของคลื่นพาห์ให้เปลี่ยนแปลงตามในขณะที่ความถี่และเฟสยังคงเดิม

การหาค่ากำลังส่งของสัญญาณที่ทำการมอดูเลตทางแอมพลิจูดแบบ DSB-SC หาได้จาก

$$P_t = \frac{A_c^2}{2} \left(1 + \frac{\mu^2}{2} \right) \quad (3.10)$$

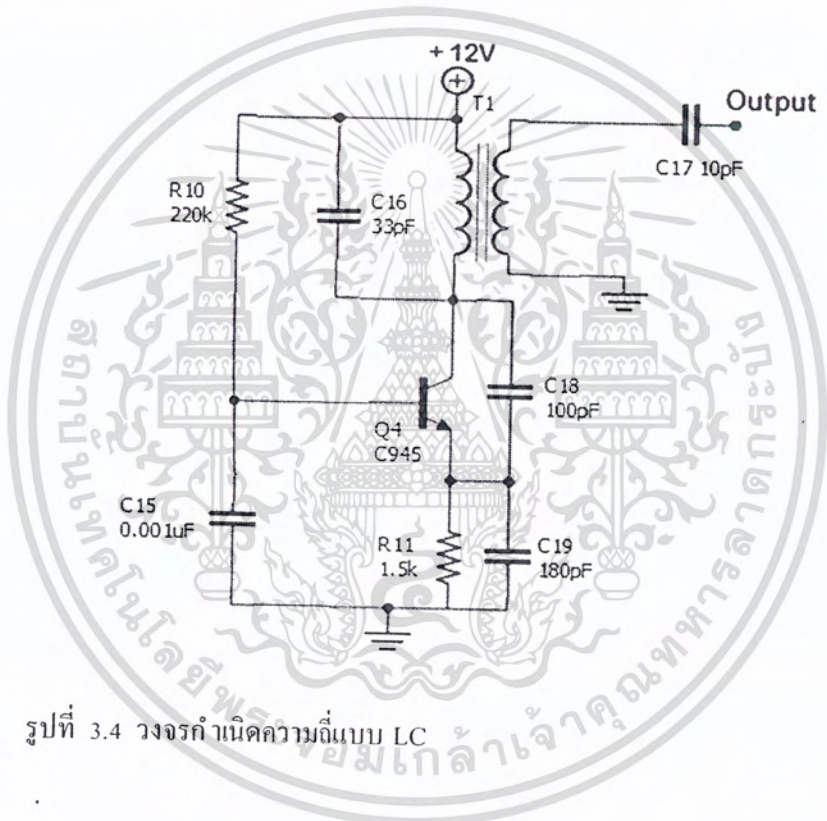
ซึ่งค่า μ คือดัชนีการมอดูเลตแอมพลิจูด (Amplitude Modulation Index) ซึ่งค่า μ ควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ถ้า μ มีค่ามากกว่า 1 เราจะไม่สามารถทำการตรวจจับกรอบสัญญาณข่าวสารจากสัญญาณเอเอ็มได้ ซึ่งในกรณีนี้เราจะเรียกว่าเกิดการมอดูเลตเกิน หรือ โอเวอร์มอดูเลชัน (Over Modulation) ขึ้น ปกติค่าดัชนีการมอดูเลตนี้ มักจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์โดยคิดเทียบ $\mu = 1$ คือร้อยเปอร์เซ็นต์

ค่าดัชนีการมอดูเลตแอมพลิจูดหาได้จาก

$$\mu = \frac{A_m}{A_c} \quad (3.11)$$

3.2 วงจรภาคส่งสัญญาณเสียง

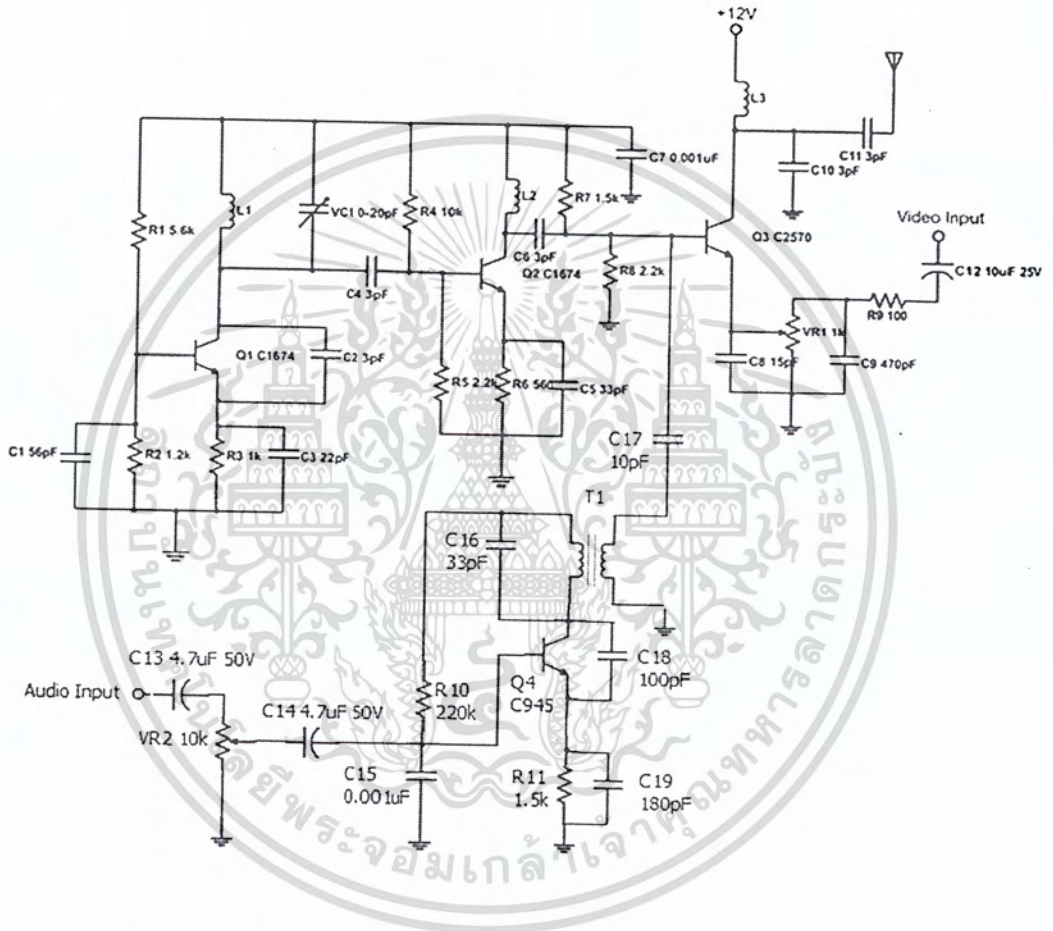
3.2.1 วงจรกำเนิดความถี่แบบ LC



รูปที่ 3.4 วงจรกำเนิดความถี่แบบ LC

Q4 เป็นวงจรกำเนิดความถี่หรือวงจรออสซิลเลเตอร์แบบ LC ชนิดกราวด์-เบสโคลพิตต์ เช่นเดียวกับ Q1 แต่จัดวงจรเป็นแบบ VCO (Voltage Control Oscillator) ที่ควบคุมแรงดัน โดยมี R10 ,R11 เป็น R ไบอัส C15 ทำหน้าที่บายพาสความถี่สูงที่ขั้วเบส C18 กับ C19 เป็นตัวแบ่งแรงดันกำหนดอัตราส่วนของสัญญาณที่จะทำการป้อนกลับจากคอลเลคเตอร์มายังอิมิตเตอร์ เช่นเดียวกับ C2 และ C3

สัญญาณเสียงจะถูกมอดูเลตแบบ FM โดยมีความถี่กลาง กำหนดจากค่าของ T1 และ C16 จากนั้นจะถูกคัปปลิ่งผ่าน C17 ไปขาเบสของ Q3 ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.5 การเชื่อมต่อระหว่างวงจรภาคส่งเสียงกับวงจรภาคส่งภาพ

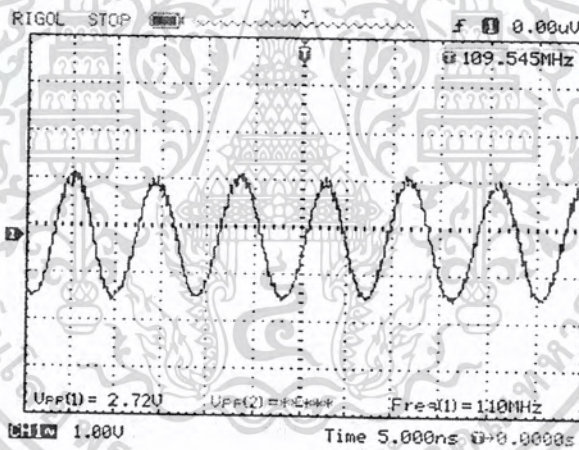
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดสอบวงจรกำเนิดความถี่

การทดสอบวงจรกำเนิดความถี่ ทำได้โดยการต่อวงจรตามรูป 3.2 จ่ายไฟให้กับวงจรขนาด 12 Volt แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมโดยทำการปรับทริเมอร์ VC_1 เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีความถี่คงที่และมีแอมพลิจูดที่สม่ำเสมอ



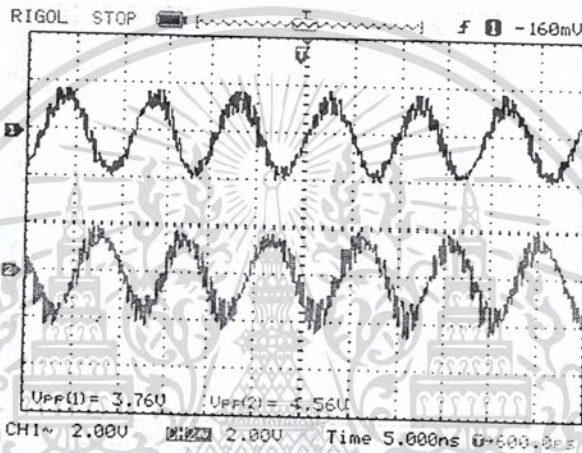
รูปที่ 4.1 สัญญาณจากวงจรกำเนิดความถี่

จากรูปที่ 4.1 พบว่าสัญญาณจะมีแอมพลิจูดสม่ำเสมอเมื่อปรับทริเมอร์ไปยังความถี่ที่

110 MHz

4.2 การทดสอบวงจรถยาย

ทำได้โดยการป้อนสัญญาณที่ได้จากวงจรกำเนิดความถี่ไปยังวงจรในรูปที่ 3.3 แล้วทำการวัดสัญญาณที่เอาต์พุต

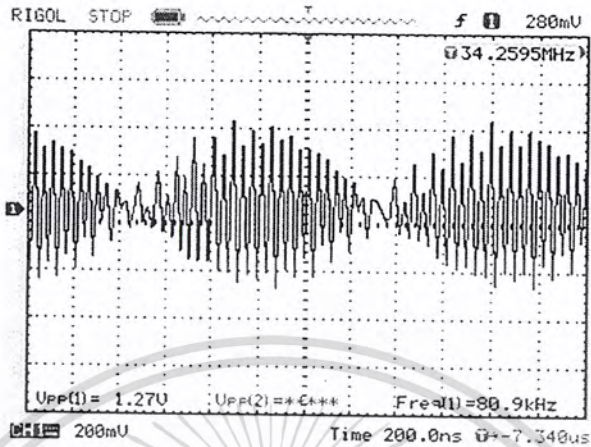


รูปที่ 4.2 สัญญาณที่ได้จากวงจรถยาย

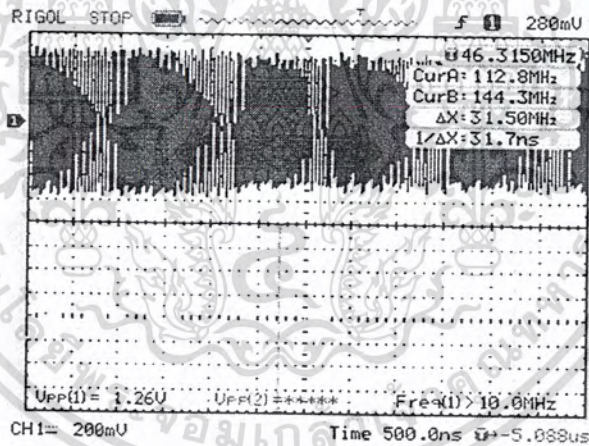
จากรูปที่ 4.2 ทำการวัดแอมพลิจูดของสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณเทียบกับวงจรถยายพบว่าวงจรถยายสามารถขยายสัญญาณได้ประมาณ 1.212 เท่า

4.3 การทดสอบวงจรมอดูเลตทางแอมพลิจูด

การทดสอบทำได้โดยการป้อนสัญญาณจากเครื่องเล่นวีดีโอผ่านวงจรมอดูเลตทางแอมพลิจูดเพื่อทำการมอดูเลตแบบ AM กับสัญญาณคลื่นพาห์ที่สร้างขึ้นจากวงจรกำเนิดความถี่เพื่อทำการส่งให้กับเครื่องรับโทรทัศน์ต่อไป



รูปที่ 4.3 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตกับคลื่นพาห้

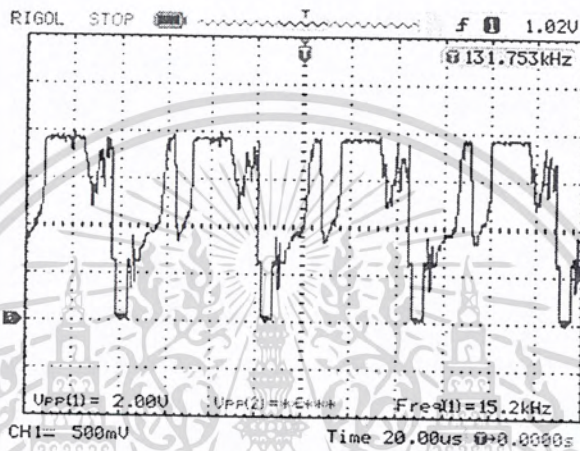


รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของสัญญาณที่ทำการมอดูเลตกับคลื่นพาห้

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าหลังจากที่ได้ทำการมอดูเลตสัญญาณที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณกับสัญญาณภาพแล้ว เครื่องส่งสัญญาณภาพไร้สายสามารถส่งสัญญาณได้ที่ความถี่ประมาณ 112.8 MHz ซึ่งใกล้เคียงกับสัญญาณที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำมามอดูเลต

4.4 การหาค่ากำลังส่งของเครื่องส่งสัญญาณ

การหาค่ากำลังส่งของเครื่องส่งทำได้โดยการคำนวณจากสมการที่ 10 โดยทำการวัดเทียบกันระหว่างแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นพาห์และแอมพลิจูดของสัญญาณภาพ



รูปที่ 4.5 สัญญาณภาพที่ได้จากเครื่องเล่นวิดีโอ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 2 Volt ซึ่งขนาดของสัญญาณคลื่นพาห์ดังรูปที่ 4.1 มีขนาด 2.72 Volt เมื่อนำไปคำนวณตามสมการที่ 3.10 พบว่ากำลังส่งที่เครื่องส่งทำการส่งออกมามีค่าเท่ากับ 4.698 W หรือมีค่าเท่ากับ 6.719 dB

4.5 การทดสอบระยะการส่งสัญญาณของเครื่องส่ง

การทดสอบทำได้โดยการส่งสัญญาณภาพจากเครื่องส่งสัญญาณภาพไร้สาย จากนั้นทำการปรับระยะห่างในการส่งสัญญาณแล้วทำการวัดระยะที่สามารถส่งได้

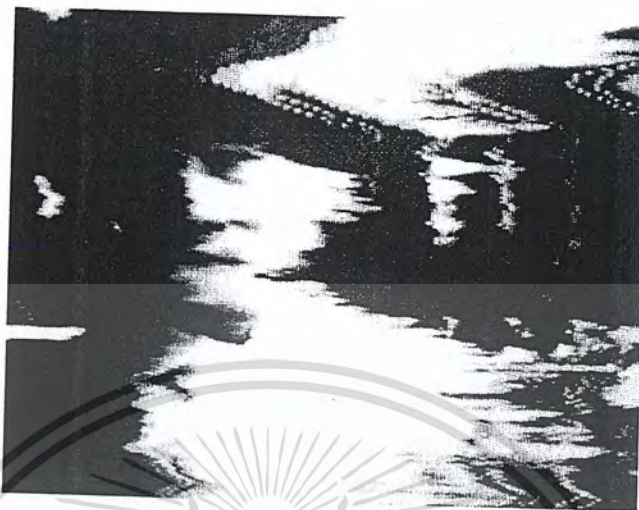


รูปที่ 4.6 ภาพที่ได้จากระยะ 1 ถึง 4 เมตร



รูปที่ 4.7 ภาพที่ได้จากระยะ 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพที่ได้จากระยะ 8 เมตร



รูปที่ 4.9 ภาพที่ได้จากระยะเกิน 10 เมตรขึ้นไป

จากการทดลองพบว่าเครื่องส่งสัญญาณภาพไร้สายสามารถส่งสัญญาณได้ดีกมชัดในระยะที่ไม่เกิน 4 เมตรหลังจากนั้นจะเกิดสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้นตามระยะทางที่มากขึ้นและจะเริ่มรับสัญญาณภาพไม่ได้ในระยะที่เกิน 10 เมตรขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการทดลองโดยทำการสร้างวงจรส่งสัญญาณภาพไร้สายเพื่อทำการส่งสัญญาณภาพในย่านความถี่ VHF พบว่า วงจรกำเนิดความถี่สามารถสร้างสัญญาณความถี่ได้ แต่ระดับสัญญาณหรือแอมพลิจูดไม่คงที่ ทำให้ไม่ได้รับความถี่ที่ต้องการตามการคำนวณในบทที่ 3 อีกทั้งยังมีสัญญาณรบกวนอยู่บ้าง ในส่วนของวงจรขยายสัญญาณสามารถขยายสัญญาณได้ที่ประมาณ 1.212 เท่า ซึ่งคลาดเคลื่อนจากที่คำนวณไว้ที่ 1.303 เท่า และสุดท้ายส่วนของวงจรมอดูเลตทางแอมพลิจูดสามารถทำการมอดูเลตได้เป็นอย่างดีทำให้สามารถส่งสัญญาณไปยังโทรทัศน์ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) เนื่องจากสัญญาณคลื่นพาห่ที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณมีสัญญาณรบกวนอยู่บ้างทำให้เมื่อผ่านวงจรขยาย วงจรขยายจึงทำการขยายสัญญาณรบกวนด้วย จึงควรใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพมากขึ้นเพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีขึ้น
- 2) เนื่องจากการส่งสัญญาณไปยังโทรทัศน์ยังส่งได้ไม่ไกลมากนัก อาจพัฒนาโดยการเพิ่มกำลังในการส่งให้สามารถส่งได้ไกลมากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] ทีมงานสมาร์ตเลิร์นนิ่ง. *ออกแบบหลายวงจรพิมพ์ด้วยProtel 99SE*. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนสามัญศ
สมาร์ตเลิร์นนิ่ง, 2551
- [2] มงคล ทองสงคราม. *อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น*. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิเจ พรินต์ติ้ง, 2551
- [3] ผศ.ดร. จีรสุตา โกษิยาภรณ์. *วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์*. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิเจ พริน-
ติ้ง, 2551
- [4] เว็บไซต์การเรียนรู้วิชาอิเล็กทรอนิกส์. “เครื่องส่งวิทยุ.”
<http://202.143.171.132/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%99%E0%B8%84%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B8%9E%E0%B8%B4%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%9C%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B9%80%E0%B8%A7%E0%B9%87%E0%B8%9A/fscommand/unit08.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

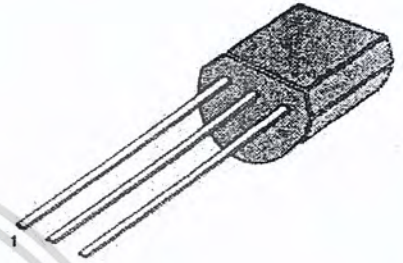
TV PIF AMPLIFIER, FM TUNER RF AMPLIFIER, MIXER, OSCILLATOR

- Collector-Emitter Voltage: $V_{CE0}=20V$
- Collector Dissipation: $P_C(max)=250mW$

Absolute Maximum Ratings (TA=25°C)

Characteristic	Symbol	Rating	Unit
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	30	V
Collector-Emitter Voltage	V_{CE0}	20	V
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	4	V
Collector Current	I_C	20	mA
Collector Dissipation	P_C	250	mW
Junction Temperature	T_J	150	°C
Storage Temperature	T_{STG}	-55~+150	°C

TO-92



1. Emitter 2. Base 3. Collector

Electrical Characteristics (TA=25°C)

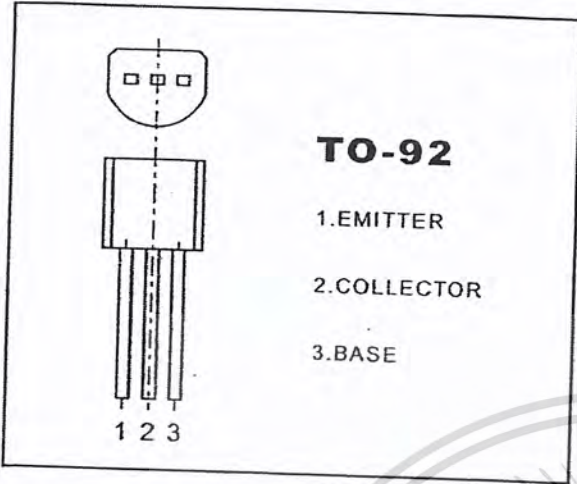
Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Collector-Base Breakdown Voltage	BV_{CBO}	$I_C = 10\mu A, I_E = 0$	30			V
Collector-Emitter Breakdown Voltage	BV_{CE0}	$I_C = 5mA, I_B = 0$	20			V
Emitter-Base Breakdown Voltage	BV_{EBO}	$I_E = 10\mu A, I_C = 0$	4			V
Collector Cut-off Current	I_{CBO}	$V_{CB} = 30V, I_E = 0$			0.1	μA
Emitter Cut-off Current	I_{EBO}	$V_{EB} = 4V, I_C = 0$			0.1	μA
DC Current Gain	h_{FE}	$V_{CE} = 6V, I_C = 1mA$	40		240	
Base-Emitter On Voltage	$V_{CE(ON)}$	$V_{CE} = 6V, I_C = 1mA$		0.72		
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_C = 10mA, I_B = 1mA$		0.1	0.3	V
Transition Frequency	f_T	$V_{CE} = 6V, I_C = 1mA$	400	600		MHz
Output Capacitance	C_{OB}	$V_{CB} = 6V, I_E = 0, f = 1MHz$		1.2		pF

h_{FE} CLASSIFICATION

Classification	R	O	Y
h_{FE}	40 ~ 80	70 ~ 140	120 ~ 240

TO-92 Plastic-Encapsulate Transistors

C945 TRANSISTOR(NPN)



FEATURES

Power dissipation

P_{CM} : 0.4W ($T_{amb}=25^{\circ}C$)

Collector current

I_{CM} : 0.15 A

Collector-base voltage

$V_{(BR)CBO}$: 60 V

Operating and storage junction temperature range

T_J, T_{stg} : $-55^{\circ}C$ to $+150^{\circ}C$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

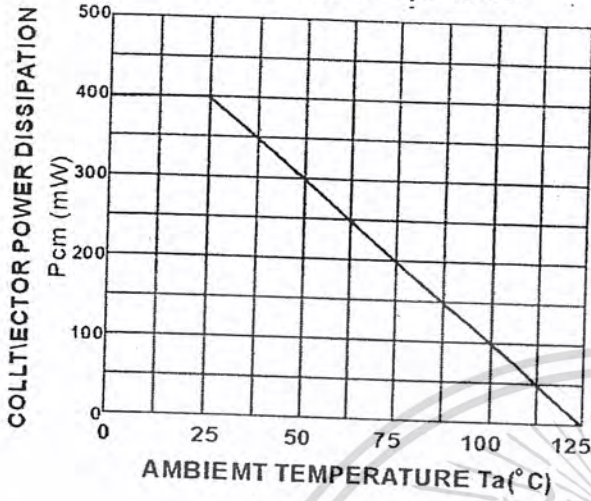
($T_{amb}=25^{\circ}C$ unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Test conditions	MIN	MAX	UNIT
Collector-base breakdown voltage	$V_{(BR)CBO}$	$I_C = 1000 \mu A, I_E = 0$	60		V
Collector-emitter breakdown voltage	$V_{(BR)CEO}$	$I_C = 0.1 mA, I_B = 0$	50		V
Emitter-base breakdown voltage	$V_{(BR)EBO}$	$I_E = 100 \mu A, I_C = 0$	5		V
Collector cut-off current	I_{CBO}	$V_{CB} = 60 V, I_E = 0$		0.1	μA
Collector cut-off current	I_{CER}	$V_{CE} = 55 V, R = 10 M\Omega$		0.1	μA
Emitter cut-off current	I_{EBO}	$V_{EB} = 5 V, I_C = 0$		0.1	μA
DC current gain	$h_{FE(1)}$	$V_{CE} = 6 V, I_C = 1 mA$	70	700	
	$h_{FE(2)}$	$V_{CE} = 6 V, I_C = 0.1 mA$	40		
Collector-emitter saturation voltage	V_{CEsat}	$I_C = 100 mA, I_B = 10 mA$		0.3	V
Base-emitter saturation voltage	V_{BEsat}	$I_C = 100 mA, I_B = 10 mA$		1	V
Base-emitter voltage	V_{BE}	$I_E = 310 mA$		1.4	V
Transition frequency	f_r	$V_{CE} = 6 V, I_C = 10 mA$ $f = 30 MHz$	150		MHz

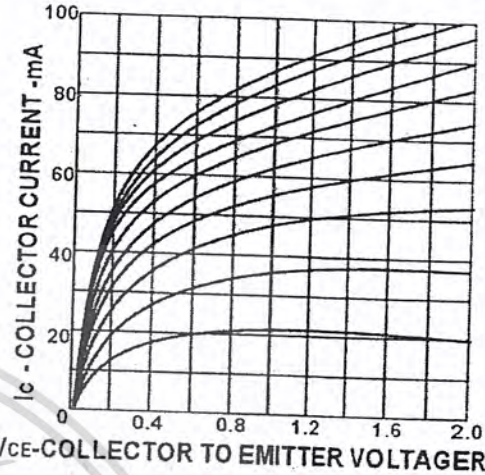
CLASSIFICATION OF $h_{FE(1)}$

Rank	O	Y	GR	BL
Range	70-140	120-240	200-400	350-700

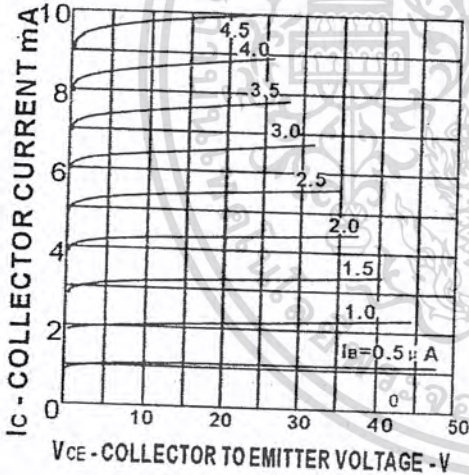
TOTAL Power Dissipation vs AMBIENT Temperature



COLLECTOR CURRENT vs COLLECTOR TO EMITTER VOLTAGE

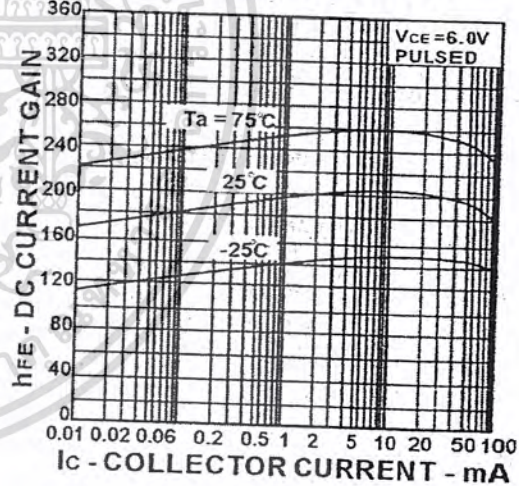


COLLECTOR CURRENT vs. COLLECTOR TO EMITTER VOLTAGE

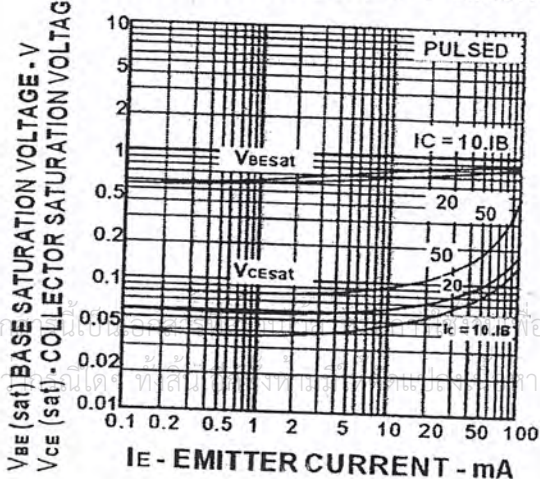


f_T - GAIN BANDWIDTH PRODUCT - Mhz

DC CURRENT GAIN vs. COLLECTOR CURRENT



COLLECTOR AND BASE SATURATION VOLTAGE vs. COLLECTOR CURRENT



DC CURRENT GAIN vs. COLLECTOR CURRENT

