



통신공학

4강. 진폭 변조

CONTENTS

- DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)
- DSB-TC (Double Sideband Transmitted Carrier)
- SSB (Single Sideband)
- VSB (Vestigial Sideband)
- 반송파 추적
- 주파수 분할 다중화와 수퍼헤테로다인 수신기



변조란?

- 변조(modulation)
 - 신호를 주어진 통신 채널에 적합하도록 신호를 조작하는 과정
 - 일반적으로 신호가 원래 가지고 있는 주파수 범위(기저대역: baseband)보다 충분히 큰 주파수 대역으로 스펙트럼을 이동시켜 전송한다.
- Baseband Modulation
- Bandpass Modulation



변조의 필요성

■ 안테나 크기

- 반파장-다이폴(dipole) 안테나의 경우 안테나의 길이가 신호 파장의 절반 정도일 때 최대 방사 효율
- 음성 신호를 기저대역으로 전송하는 경우, 3KHz 성분

$$L = \frac{\lambda_o}{2} = \frac{C}{2f_o} = \frac{3 \times 10^8 \text{m/sec}}{2 \times 3000 \text{Hz}} = 50 \text{km}$$

- 스펙트럼을 3GHz대로 이동시켜 전송하는 경우

$$L = \frac{\lambda_o}{2} = \frac{C}{2f_o} = \frac{3 \times 10^8 \text{m/sec}}{2 \times 3 \times 10^9 \text{Hz}} = 5 \text{cm}$$

- 잡음의 영향을 적게 받도록 하기 위하여
- 다중화/다중 접속



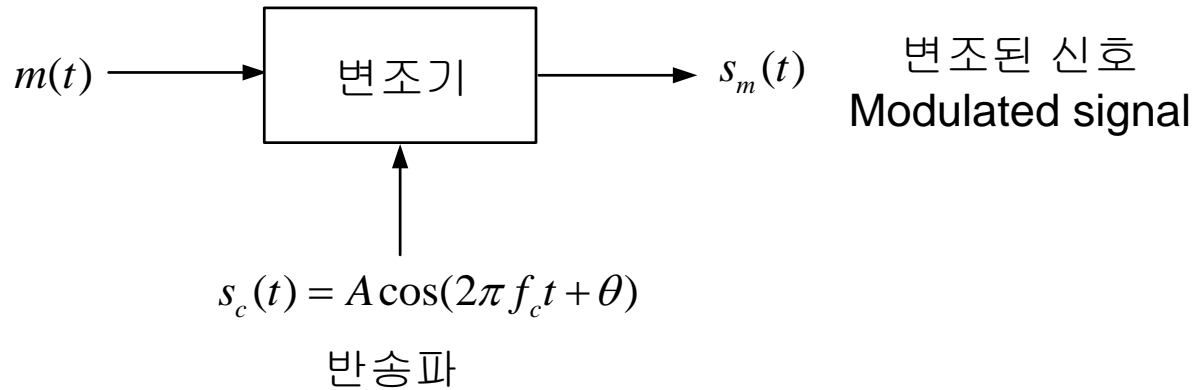
변조 모델

■ Modulated Carrier

- 3 parameters: 진폭, 주파수, 위상

$$A(t) \cos(2\pi f_c t + \phi(t))$$

메시지 신호
Modulating signal



변조

- 변조의 종류
 - 진폭 변조(AM)
 - 각 변조 – 주파수 변조(FM), 위상 변조(PM)
- 진폭변조란?
 - 정보 신호에 따라 반송파의 진폭을 변화시키는 변조 방식
- 진폭변조 의 종류
 - DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)
 - DSB-TC (Double Sideband Transmitted Carrier)
 - SSB (Single Sideband)
 - VSB (Vestigial Sideband)



용어

- 정보 신호, 메시지 신호, 변조 신호(modulating signal)

$$m(t)$$

- 반송파(carrier) 신호

$$s_c(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t + \theta)$$

- 변조된 신호, 피변조 신호(modulated signal)

$$s_m(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t + \phi(t))$$

- 진폭변조의 경우 $A(t)$ 를 $m(t)$ 에 비례하게 결정



- **DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)**
- DSB-TC (Double Sideband Transmitted Carrier)
- SSB (Single Sideband)
- VSB (Vestigial Sideband)
- 반송파 추적
- 주파수 분할 다중화와 수퍼헤테로다인 수신기

양측파대 억압 반송파 진폭변조 (Double Sideband Suppressed Carrier:DSB-SC; DSB)



DSB-SC

■ DSB-SC Modulation

$$s_m(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t + \theta)$$
$$A(t) = km(t)$$

- 가정: $k = 1, \theta = 0$ (for simplicity)
- Then

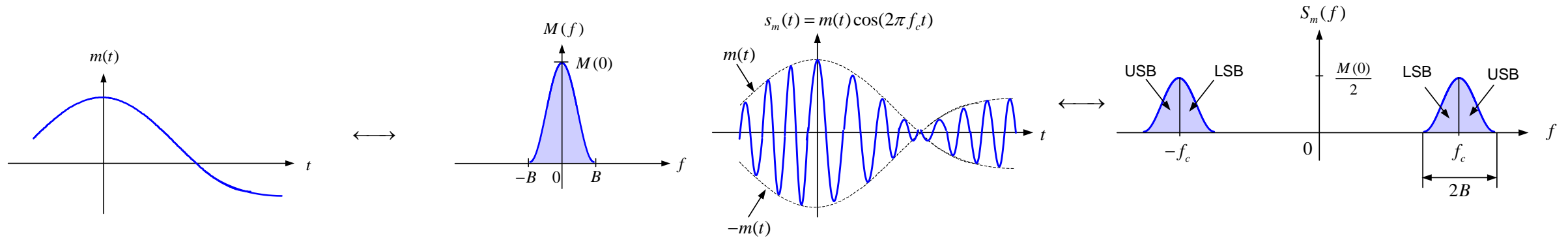
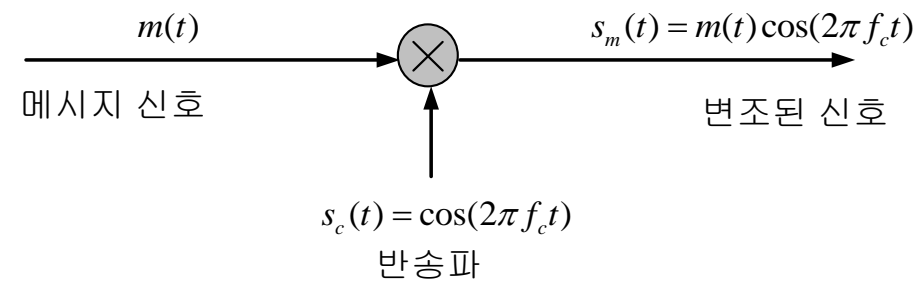
$$s_m(t) = m(t) \cdot s_c(t) = m(t) \cos(2\pi f_c t)$$

■ 스펙트럼

$$S_m(f) = \mathcal{F}\{s_m(t)\} = \mathcal{F}\{m(t) \cos 2\pi f_c t\} = \frac{1}{2}\{M(f - f_c) + M(f + f_c)\}$$



DSB-SC 변조 과정



DSB-SC

[예제 4.1]

- 메시지 신호:

$$m(t) = \frac{\sin(2\pi t)}{\pi t}$$

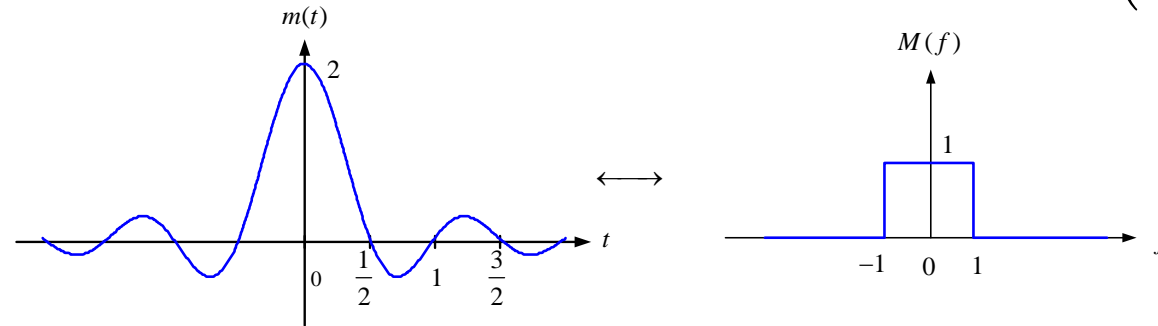
- 주파수가 100 Hz인 반송파를 사용하여 DSB-SC 변조를 한다고 하자.
- - 변조된 신호의 파형과 스펙트럼을 구하고 그려보라.
- - 메시지 신호와 변조된 신호의 대역폭을 구하라.



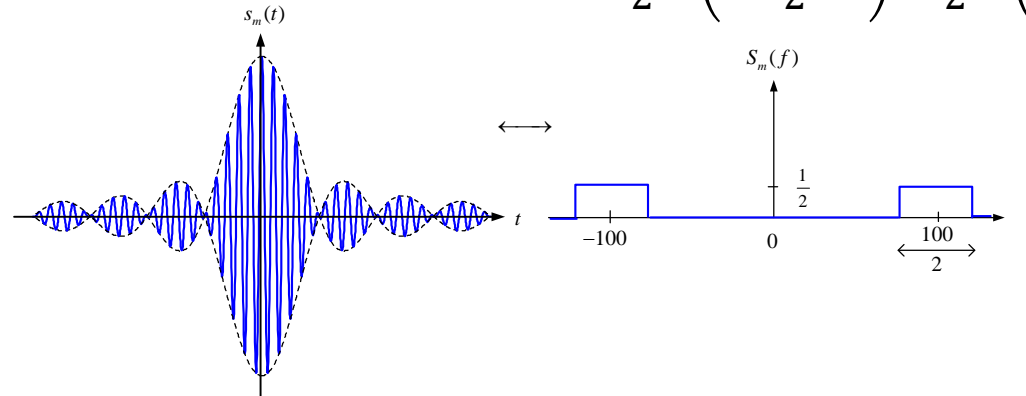
DSB-SC

[풀이]

$$m(t) = \frac{\sin(2\pi t)}{\pi t} = 2 \frac{\sin(2\pi t)}{2\pi t} = 2\text{sinc}(2t) = A\tau\text{sinc}(\tau t), \quad M(f) = A\Pi\left(\frac{f}{\tau}\right) = \Pi\left(\frac{f}{2}\right)$$

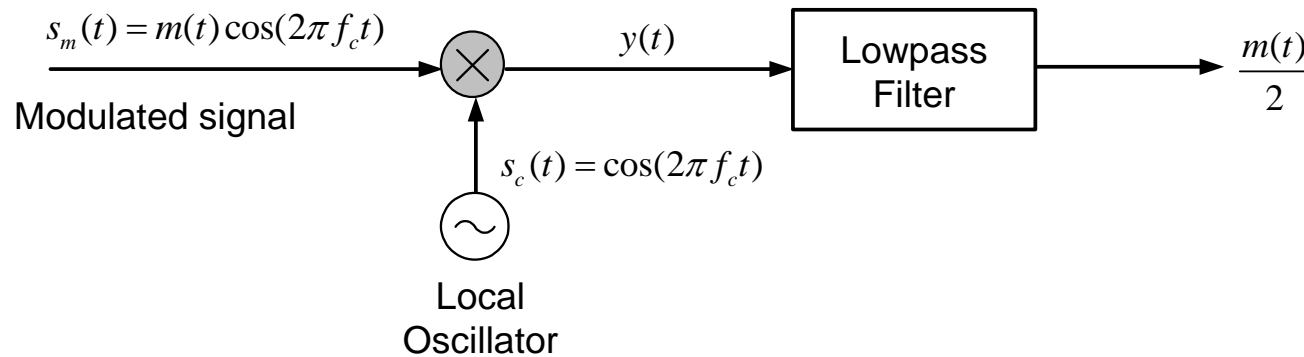


$$s_m(t) = 2\text{sinc}(2t) \cos(200\pi t), \quad S_m(f) = \frac{1}{2} \Pi\left(\frac{f-100}{2}\right) + \frac{1}{2} \Pi\left(\frac{f+100}{2}\right)$$



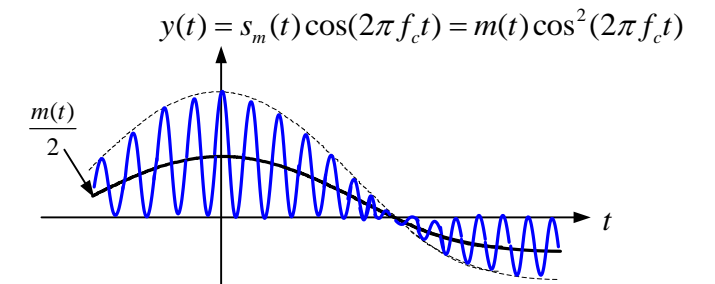
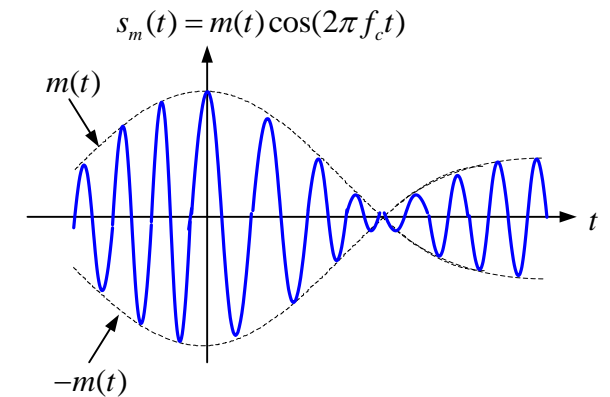
DSB-SC 복조

■ Coherent Detection



$$y(t) = s_m(t) \cos(2\pi f_c t) = m(t) \cos^2(2\pi f_c t) = \frac{1}{2} m(t) [1 + \cos(4\pi f_c t)],$$

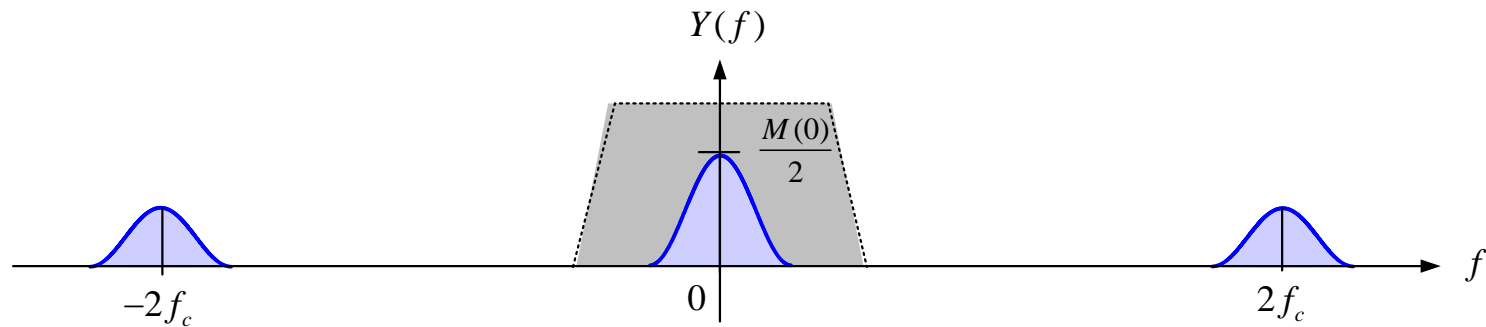
$$\{y(t)\}_{LPF} = \frac{1}{2} m(t)$$



DSB-SC 복조

$$y(t) = s_m(t) \cos(2\pi f_c t)$$

$$Y(f) = \mathcal{F}[s_m(t) \cos(2\pi f_c t)] = \frac{S_m(f + f_c) + S_m(f - f_c)}{2} = \frac{1}{2}M(f) + \frac{1}{4}M(f + 2f_c) + \frac{1}{4}M(f - 2f_c)$$



DSB-SC

[예제 4.2]

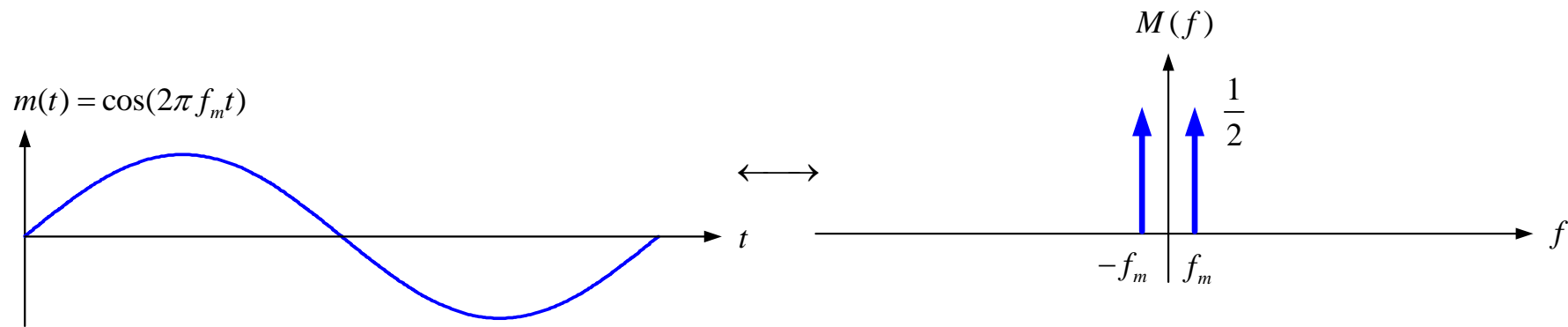
- 정현파 메시지 신호: $m(t) = \cos(2\pi f_m t)$
 - (a) 이 신호를 주파수가 $f_c \gg f_m$ 인 반송파를 사용하여 DSB-SC 변조하는 경우 변조된 신호의 파형과 스펙트럼을 그려보라. 신호의 스펙트럼에서 상측파대와 하측파대를 표시하라.
 - (b) 복조 과정에서의 신호의 파형과 스펙트럼을 그려보라.



DSB-SC

[풀이]

$$m(t) = \cos(2\pi f_m t), \quad M(f) = \frac{1}{2} [\delta(f - f_m) + \delta(f + f_m)]$$

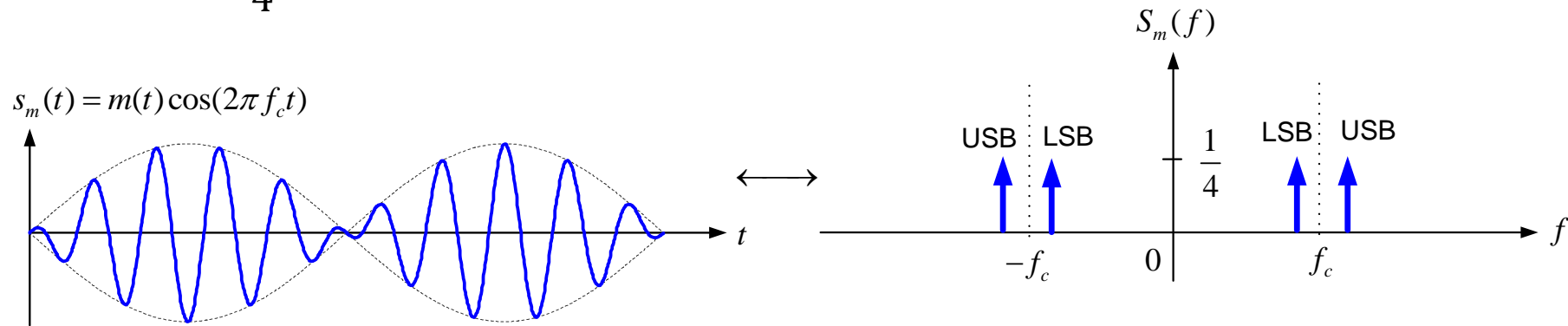


DSB-SC

[풀이]

$$s_m(t) = m(t) \cos(2\pi f_c t) = \cos(2\pi f_m t) \cos(2\pi f_c t) = \frac{1}{2} [\cos(2\pi(f_c - f_m)t) + \cos(2\pi(f_c + f_m)t)]$$

$$S_m(f) = \frac{1}{4} [\delta(f - f_c - f_m) + \delta(f - f_c + f_m) + \delta(f + f_c - f_m) + \delta(f + f_c + f_m)]$$



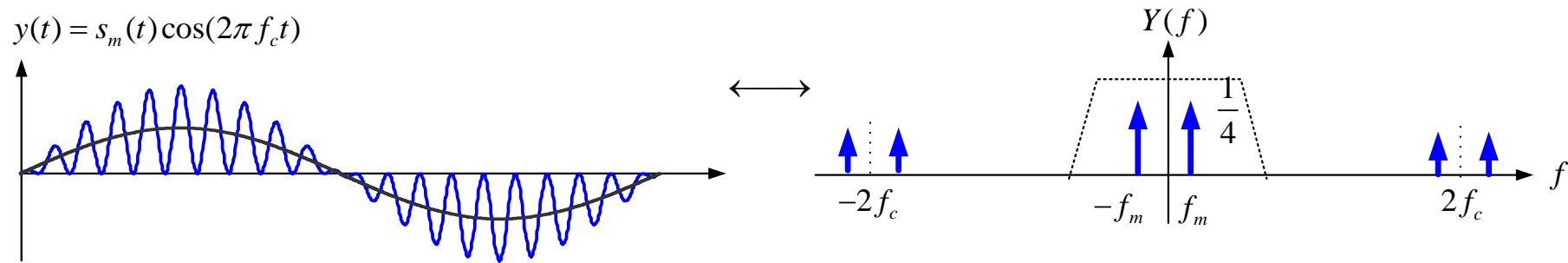
변조된 신호의 스펙트럼을 보면 반송파 주파수 f_c 에 아무런 신호도 없는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유로 억압 반송파 변조방식으로 불린다.

DSB-SC

[풀이]

$$\begin{aligned}
 y(t) &= s_m(t) \cos(2\pi f_c t) = \cos(2\pi f_m t) \cos^2(2\pi f_c t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi f_m t) [1 + \cos(4\pi f_c t)] \\
 &= \frac{1}{2} \cos(2\pi f_m t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi f_m t) \cos(4\pi f_c t)
 \end{aligned}$$

$$\{y(t)\}_{LPF} = \frac{1}{2} \cos(2\pi f_m t)$$



COHERENT DETECTION

■ 수신기의 국부 발진기와 반송파가 동기되지 않은 경우

- 가정: 주파수 오차 Δf , 위상 오차 $\Delta\theta$

$$\begin{aligned} y(t) &= s_m(t) \cos[(2\pi(f_c + \Delta f)t) + \Delta\theta] = m(t) \cos(2\pi f_c t) \cos[(2\pi(f_c + \Delta f)t) + \Delta\theta] \\ &= \frac{1}{2} m(t) \cos(2\pi\Delta f t + \Delta\theta) + \frac{1}{2} m(t) \cos[(2\pi(2f_c + \Delta f)t) + \Delta\theta] \end{aligned}$$

- 저역통과 필터를 통하면

$$\{y(t)\}_{\text{LPF}} = \frac{1}{2} m(t) \cos(2\pi\Delta f t + \Delta\theta)$$

- 만일 주파수 오차는 없고 위상 오차만 있다면

$$\{y(t)\}_{\text{LPF}} = \frac{1}{2} m(t) \cos(\Delta\theta)$$



COHERENT DETECTION

- 위상 오차에 따라 출력의 크기가 작아진다.
- 만일 $\Delta\theta$ 가 90° 에 근접하면 출력 신호가 없어진다.
- 위상 오차는 없고 주파수 오차만 있다면

$$\{y(t)\}_{\text{LPF}} = \frac{1}{2}m(t) \cos(2\pi\Delta f t)$$

- 위의 식은 원하는 신호에 낮은 주파수 Δf 의 정현파를 곱한 형태가 된다. 따라서 신호의 크기가 천천히 변동하는 형태가 되므로 이것은 결과적으로 수신기의 볼륨을 최대에서 최저로 Δf 의 주파수로 조작하는 것과 같은 효과를 보이게 된다.



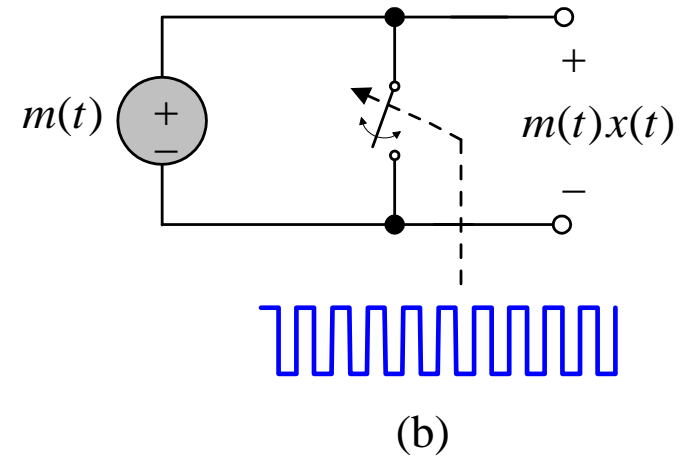
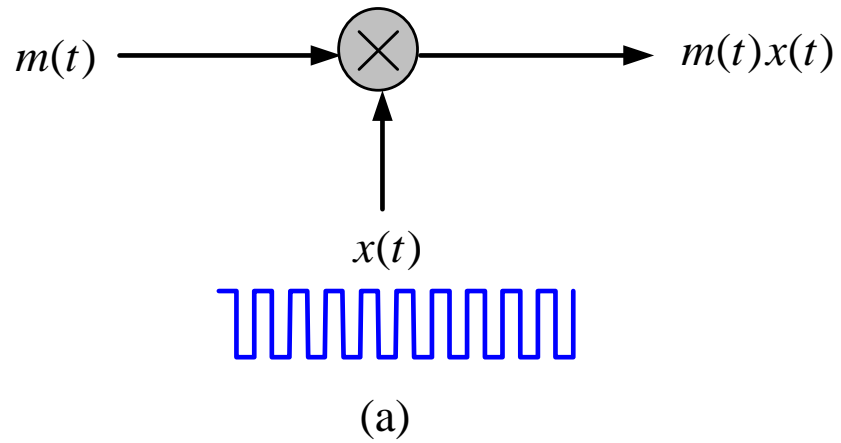
변조기

- Switching Modulator
 - DSB-SC 변조는 기저대역 신호에 정현파를 곱해서 스펙트럼을 이동시킨다.
 - 그러나 스펙트럼을 이동시키는 데는 반드시 정현파를 이용할 필요는 없다.
 - 기본 주파수가 f_c 인 임의의 주기함수를 곱해도 기저대역 스펙트럼이 $\pm f_c$ 의 위치에 이동된 스펙트럼을 얻을 수 있다.



변조기

■ Switching Modulator



변조기

■ Switching Modulator

- 기본 주파수가 f_c 인 임의의 주기 신호 $x(t)$ 는 다음과 같이 푸리에 급수를 사용하여 표현할 수 있다.

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp(-j2\pi n f_c t)$$

- 이 식에 푸리에 변환을 취하면

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \delta(f - n f_c)$$

- 따라서

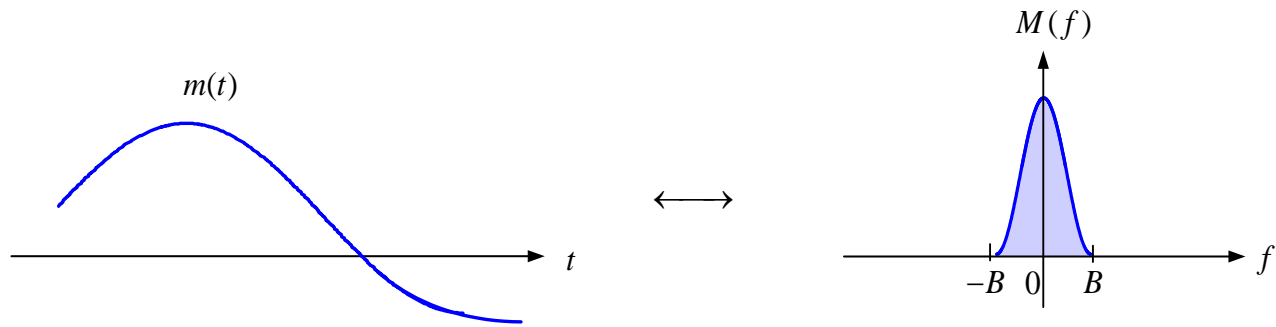
$$\mathcal{F}[m(t)x(t)] = M(f) * X(f) = M(f) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \delta(f - n f_c) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n [M(f) * \delta(f - n f_c)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n M(f - n f_c)$$



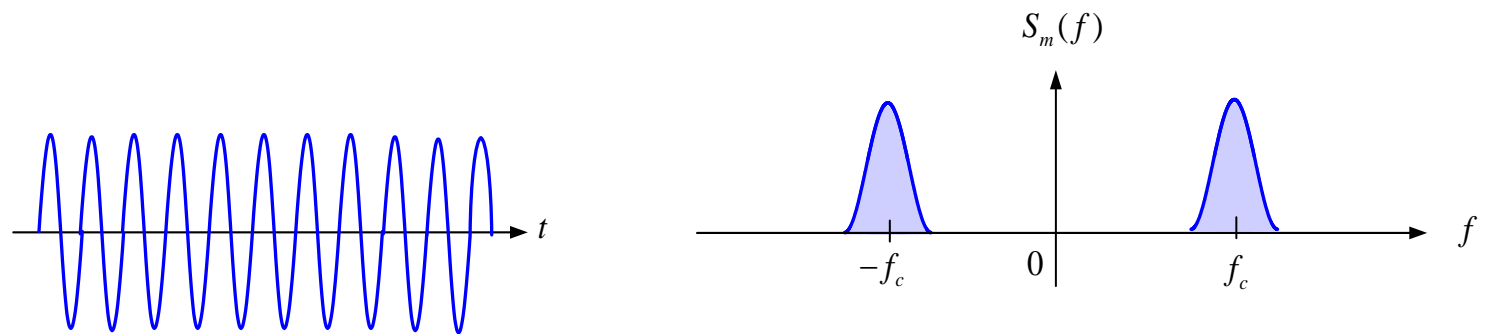
변조기

■ Switching Modulator

기저대역 신호와 스펙트럼



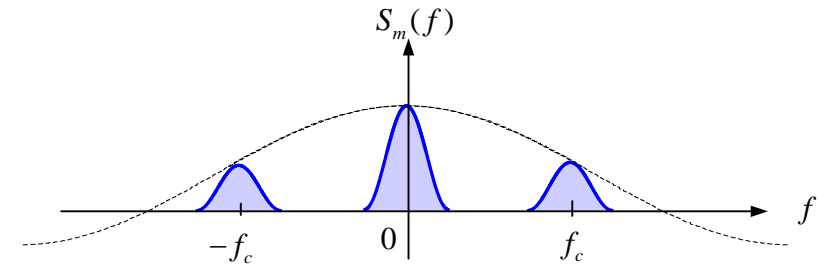
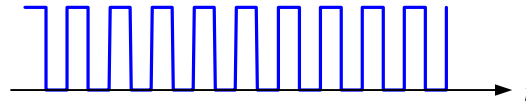
정현파와 곱셈기 출력의 스펙트럼



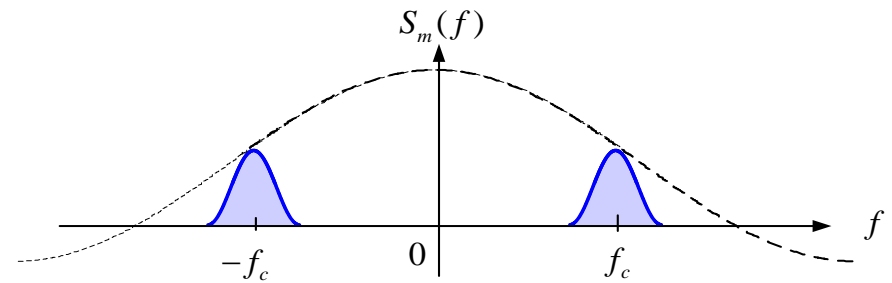
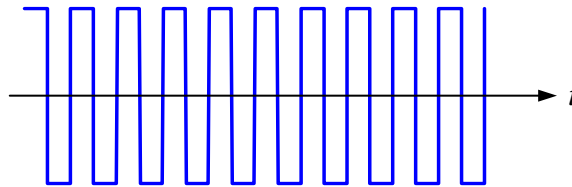
변조기

■ Switching Modulator

단극성 구형파와 곱셈기 출력의 스펙트럼



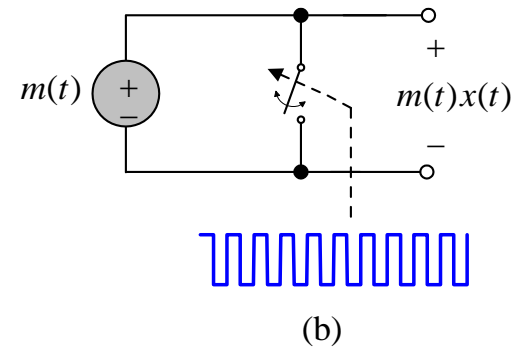
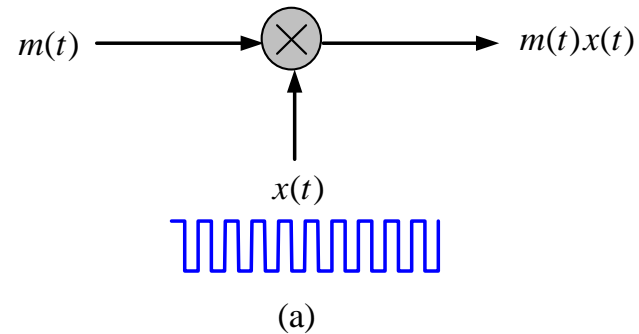
양극성 구형파와 곱셈기 출력의 스펙트럼



변조기

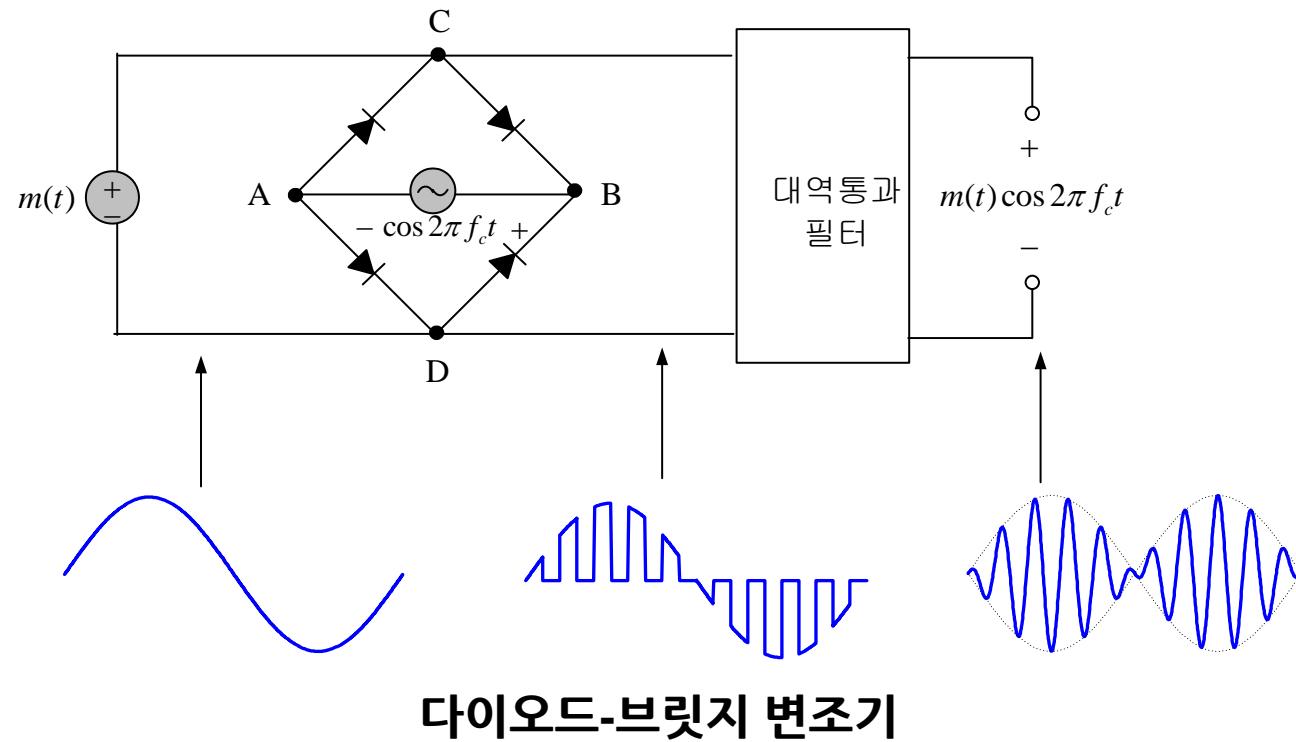
■ Switching Modulator

- 정현파 대신 곱하는 신호를 구형파 펄스열을 사용하는 경우
- 스위치를 구형 펄스열의 주기에 맞추어 개폐를 반복함으로써 구현할 수 있다.
- 기저대역 신호에 구형 펄스열을 곱하는 과정을 게이트(gate) 회로로써 구현한 변조기를 초퍼(chopper) 변조기라 한다.



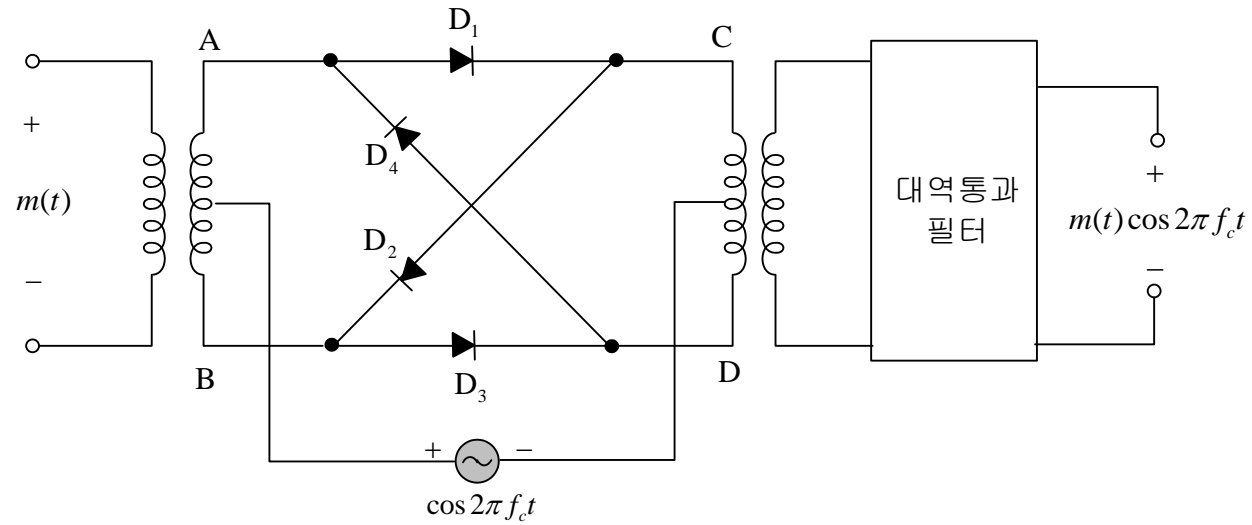
변조기

■ Switching Modulator – chopper 변조기



변조기

■ Switching Modulator – chopper 변조기

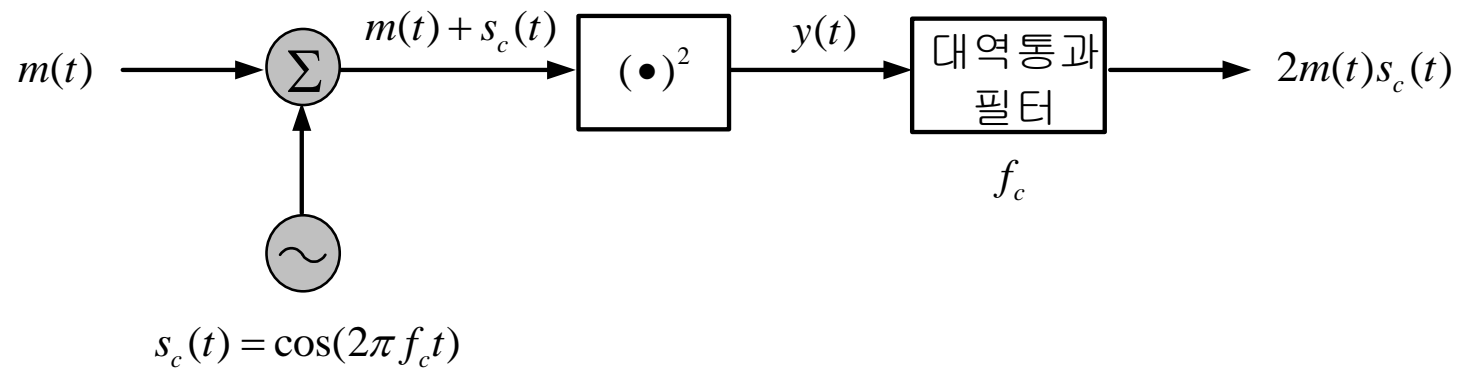


Ring 변조기

변조기

■ 비선형 변조기

- 예: Square-law 변조기



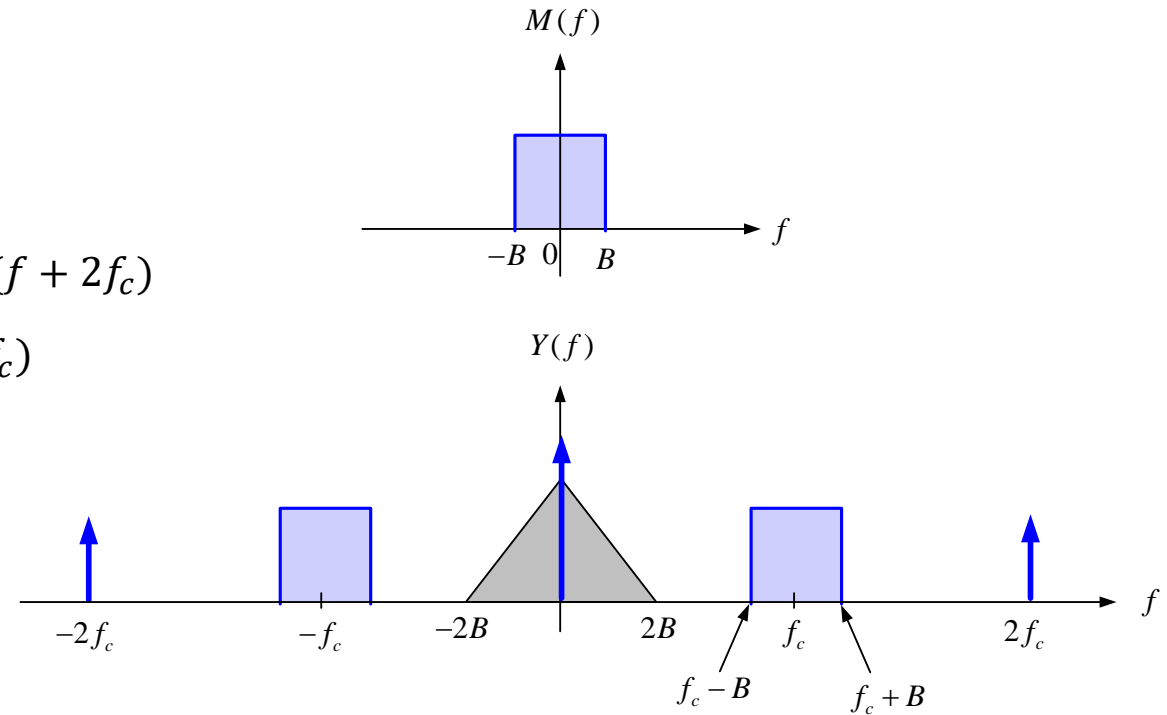
$$y(t) = [m(t) + s_c(t)]^2 = \underbrace{m^2(t) + s_c^2(t)}_{\text{원하지 않는 신호}} + \underbrace{2m(t)s_c(t)}_{\text{원하는 신호}}$$

변조기

$$\mathcal{F}[m^2(t)] = M(f) * M(f)$$

$$\mathcal{F}[s_c^2(t)] = \mathcal{F}\left[\frac{1 + \cos(4\pi f_c t)}{2}\right] = \frac{1}{2}\delta(f) + \frac{1}{4}\delta(f - 2f_c) + \frac{1}{4}\delta(f + 2f_c)$$

$$\mathcal{F}[2m(t)s_c(t)] = \mathcal{F}[2m(t)\cos(2\pi f_c t)] = M(f - f_c) + M(f + f_c)$$



변조기

■ 평형 변조기

- 제곱법 소자를 사용하면 DSB-SC 변조기를 쉽게 구현할 수 있다.
- 그러나 정확한 제곱법 특성을 가진 소자나 장치를 구현하기 어렵다는 문제점이 있다.
- 일반적인 비선형 소자의 입출력 관계:

$$y(t) = f[x(t)] = a_0 + a_1x(t) + a_2x^2(t) + a_3x^3(t) + \dots$$

- 위의 식에서 a_2 만 0이 아니고 나머지 계수는 모두 0이라면 정확한 제곱법 소자가 된다.



변조기

■ 평형 변조기

- 비선형 소자가 다음과 같이 근사화된다고 가정하자.

$$y(t) = a_1 x(t) + a_2 x^2(t)$$

- 즉 a_0, a_3, \dots 의 계수들은 무시할 만큼 작다고 하자.
- 이 경우 $x(t) = m(t) + s_c(t)$ 를 입력시킬 때의 출력은

$$y(t) = a_1[m(t) + s_c(t)] + a_2[m(t) + s_c(t)]^2 = \underbrace{a_1 m(t) + a_1 s_c(t) + a_2 m^2(t) + a_2 s_c^2(t)}_{\text{원하지 않는 신호}} + \underbrace{2a_2 m(t)s_c(t)}_{\text{원하는 신호}}$$

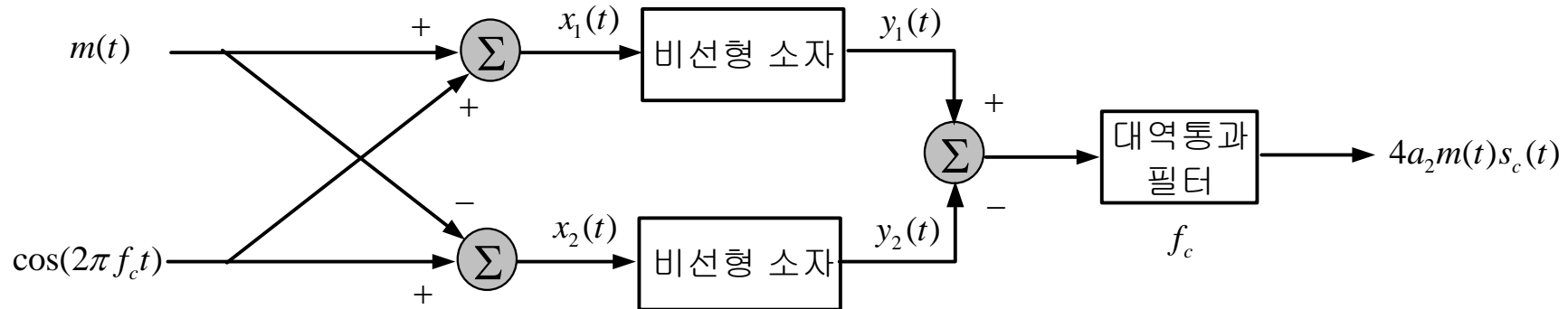
- 여기서 문제가 되는 항은 $a_1 s_c(t) = a_1 \cos 2\pi f_c t$ 의 반송파 성분으로서, 원하는 신호의 스펙트럼과 겹쳐서 대역통과 필터를 사용하여 제거할 수 없다.



변조기

■ 평형 변조기

- 이 문제를 해결하기 위한 방안으로 다음과 같은 변조기를 고려해보자.



- 출력은

$$z(t) = y_1(t) - y_2(t) = [a_1 x_1(t) + a_2 x_1^2(t)] - [a_1 x_2(t) + a_2 x_2^2(t)]$$

변조기

■ 평형 변조기

- 이 식에 $x_1(t) = m(t) + \cos 2\pi f_c t$, $x_2(t) = -m(t) + \cos 2\pi f_c t$ 를 대입하면
$$z(t) = 2a_1 m(t) + 4a_2 m(t) \cos 2\pi f_c t$$
- 대역통과 필터를 사용하면 원하는 DSB-SC 신호를 얻을 수 있다.
- 이와 같은 구조의 변조기를 평형 변조기(balanced modulator)라 부른다.
- 이러한 구조의 변조기를 사용하면 제곱법 특성에 오차가 있는 경우 그 효과를 제거할 수 있게 된다.



변조기

■ 주파수 변환기와 혼합기

- 제곱법 소자와 같은 비선형 소자를 사용하면 두 개의 입력 신호를 결합하여 두 입력 주파수의 합과 차의 성분(또는 그 이상의 주파수 조합)을 얻을 수 있다.
- 이와 같이 비선형 소자를 사용하여 두 입력 주파수의 합과 차의 성분을 얻는 회로를 혼합기(mixer)라고 한다.
- 일반적으로 두 주파수의 합과 차를 만들어 주파수를 천이시키는 장치를 주파수 변환기(frequency converter)라고 한다.



- DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)
- **DSB-TC (Double Sideband Transmitted Carrier)**
- SSB (Single Sideband)
- VSB (Vestigial Sideband)
- 반송파 추적
- 주파수 분할 다중화와 수퍼헤테로다인 수신기

양측파대 전송 반송파 진폭변조 (Double Sideband Transmitted Carrier:DSB-TC;AM)



DSB-TC

■ DSB-SC

- 동기 검파기를 사용해야 하며, 변조에서 사용된 반송파와 동일한 주파수 및 위상을 가진 반송파를 수신기에서 재생해야 하는 어려움이 있다.
- Coherent 수신기는 local oscillator를 가지고 있으며, 발진기 출력의 주파수와 위상이 반송파와 일치하도록 하는 동기 회로를 포함한다.
- 즉 수신 신호로부터 반송파를 추출하는 반송파 복구회로가 포함되어 있다.
- DSB-SC 변조된 신호의 스펙트럼을 보면 반송파 주파수 성분이 이산 스펙트럼으로 드러나 있지 않거나, 그 주파수 성분이 없을 수도 있어서 수신기에서 반송파를 추출하기가 쉽지 않다.



DSB-TC

■ DSB-TC Modulated Signal

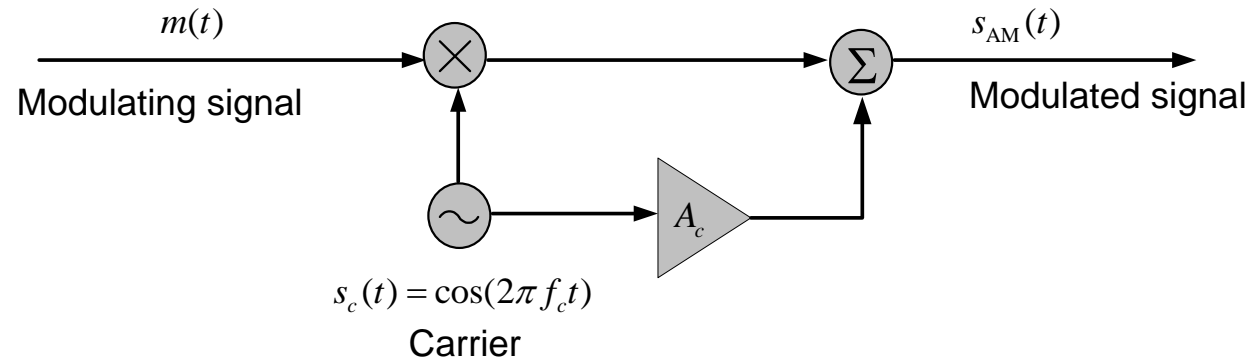
$$s_{AM}(t) = s_{DSB}(t) + A_c \cos 2\pi f_c t = [m(t) + A_c] \cos 2\pi f_c t$$

■ 추가 반송파

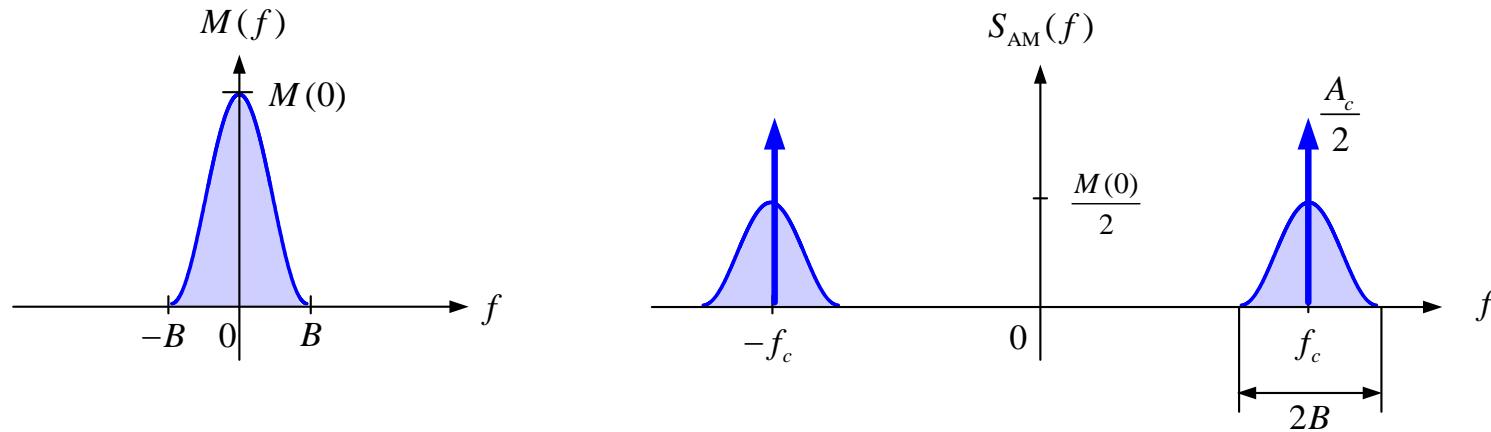
- 수신기가 동기검파를 위해 수신 신호로부터 반송파 신호를 쉽게 추출하도록 도와주는 역할
- 반송파의 크기를 충분히 크게 선정하면 envelope detector와 같은 noncoherent 복조 가능 → 반송파 추출 불필요 → 수신기 구조 간단 (방송에 적합)
- 추가 전력 필요



DSB-TC



$$S_{AM}(f) = \mathcal{F}[(m(t) + A_c) \cos 2\pi f_c t] = \frac{1}{2} [M(f - f_c) + M(f + f_c)] + \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)]$$

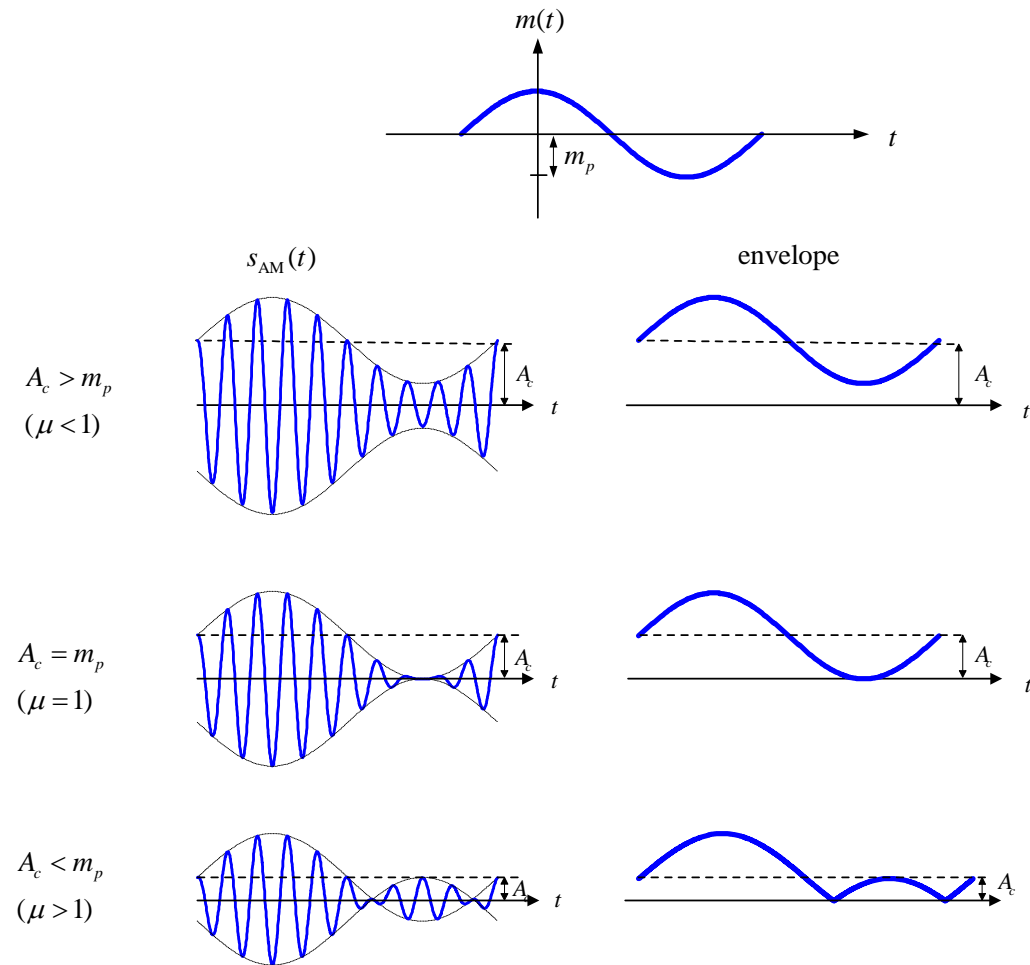


추가 반송파의 진폭과 포락선

- DSB-TC 신호의 포락선은 $|m(t) + A_c|$ 인데 만일 $m(t) + A_c \geq 0$ 라면 $|m(t) + A_c| = m(t) + A_c$ 가 된다.
- $m(t) + A_c \geq 0$ 이 만족된다면 변조된 신호의 포락선은 메시지 신호와 동일한 모양을 갖는다.
- 이 경우 수신기에서는 수신 신호의 포락선만 추출함으로써 $m(t) + A_c$ 를 복원할 수 있으며, 여기서 직류 성분만 제거하면 원 신호를 복원할 수 있다.
- 신호에서 포락선을 추출하는 것은 매우 간단히 구현할 수 있으며, 이와 같은 포락선 검출기를 사용한 복조기는 반송파의 복구를 필요로 하지 않으므로 비동기 검파(noncoherent detection)라 한다.



DSB-TC 신호와 포락선



추가 반송파의 진폭과 포락선

■ DSB-TC 신호의 포락선 검파가 가능하기 위한 조건

$$m(t) + A_c \geq 0 \quad \text{for all } t$$

- 메시지 신호의 피크 값: $m_p = |\min m(t)|$
- 편의상 $m_p = |\min m(t)| = \max|m(t)|$ 라고 하자.
- 포락선 검파가 가능하기 위한 조건을 다시 표현하면 $A_c \geq m_p$



DSB-TC 신호와 변조지수

- Modulation Index

$$\mu \triangleq \frac{m_p}{A_c} = \frac{\text{메시지 신호의 최대진폭}}{\text{추가 반송파의 최대진폭}}$$

- DSB-TC 신호의 다른 표현

$$s_{AM}(t) = [A_c + m(t)] \cos 2\pi f_c t = A_c \left[1 + \frac{m_p}{A_c} \cdot \frac{m(t)}{m_p} \right] \cos 2\pi f_c t = A_c [1 + \mu m_n(t)] \cos 2\pi f_c t$$

- $m_n(t)$: normalized baseband signal

- Envelope detection이 가능할 조건: $\mu \leq 1$



전력 효율

■ 진폭변조의 전력 효율

- AM 변조는 반송파를 추가로 전송함으로써 수신기에서 포락선 검파에 의한 간단한 복조가 가능하게 해준다.
- 그러나 추가로 전송하는 반송파에는 기저대역 신호에 대한 아무런 정보도 포함하고 있지 않으므로 전력 소모가 발생한다.
- 전체 전력 중에서 메시지 신호를 전송하는 데 사용되는 전력의 비율을 전력 효율이라 정의한다.
- DSB-SC 변조의 전력 효율은 100%
- DSB-TC 변조는 전력 효율이 항상 100%보다 작으며, 변조지수와 메시지 신호의 파형에 따라 다른 값을 갖는다.



전력 효율

■ AM 신호의 평균 전력

$$\begin{aligned}
 P &= \langle s_{AM}^2(t) \rangle_T = \langle (A_c + m(t))^2 \cos^2(2\pi f_c t) \rangle_T \\
 &= A_c^2 \langle \cos^2(2\pi f_c t) \rangle_T + \langle m^2(t) \cos^2(2\pi f_c t) \rangle_T + 2A_c \langle m(t) \cos^2(2\pi f_c t) \rangle_T \\
 &= \frac{A_c^2}{2} + \frac{1}{2} \langle m^2(t) \rangle_T + \frac{1}{2} \langle m^2(t) \cos(4\pi f_c t) \rangle_T + A_c \langle m(t) \rangle_T + A_c \langle m(t) \cos(4\pi f_c t) \rangle_T \\
 &\cong \frac{A_c^2}{2} + \frac{1}{2} \langle m^2(t) \rangle_T
 \end{aligned}$$

- 전력 효율을 전체 전력에 대한 측파대 전력의 비로 정의하면

$$\eta = \frac{P_S}{P_C + P_S} = \frac{\langle m^2(t) \rangle_T}{A_c^2 + \langle m^2(t) \rangle_T} = \frac{\mu^2 \langle m_n^2(t) \rangle_T}{1 + \mu^2 \langle m_n^2(t) \rangle_T}$$

- 변조지수가 작을수록 효율이 떨어진다.



전력 효율

- [예제 4.3]

$m_n(t)$ 가 구형파와 정현파인 경우에 대하여 포락선 검파가 가능한 AM 변조의 최대 효율을 구하라.

- [풀이]

(a) 구형파 경우

$$\begin{aligned}\langle m_n^2(t) \rangle_T &= 1 \\ \eta &= \frac{\mu^2 \langle m_n^2(t) \rangle_T}{1 + \mu^2 \langle m_n^2(t) \rangle_T} = \frac{1}{1 + 1} = \frac{1}{2} \\ \langle m_n^2(t) \rangle_T &= \frac{1}{2}\end{aligned}$$

(b) 정현파 경우

$$\eta = \frac{\mu^2 \langle m_n^2(t) \rangle_T}{1 + \mu^2 \langle m_n^2(t) \rangle_T} = \frac{\frac{1}{2}}{1 + \frac{1}{2}} = \frac{1}{3}$$



DSB-TC 변조기

■ DSB-TC 변조의 구현

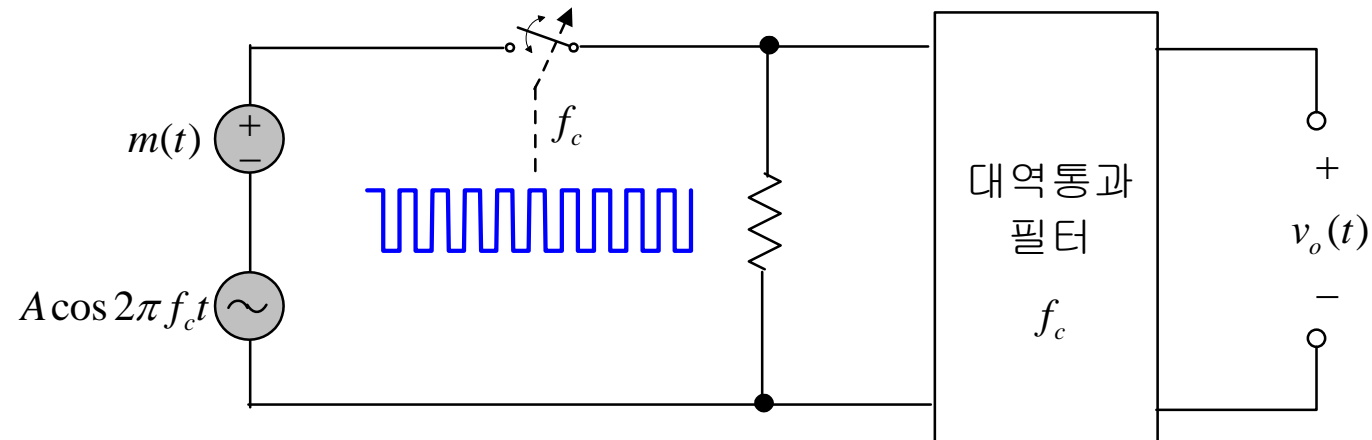
- DSB-TC 신호는 $[A_c + m(t)]$ 를 DSB-SC 변조한 것과 동일하므로 DSB-SC 변조기를 사용하여 구현 가능
- DSB-SC 변조기에서는 대역통과 필터에 들어갈 수 있는 반송파 성분을 차단해야 하므로 평형 변조기 형태의 구조를 사용한다.
- 그러나 DSB-TC 변조에서는 대역통과 필터에 입력되는 반송파를 차단할 필요가 없으므로 구현이 간단해진다.



DBS-TC 변조기

■ 스위치 변조기의 예

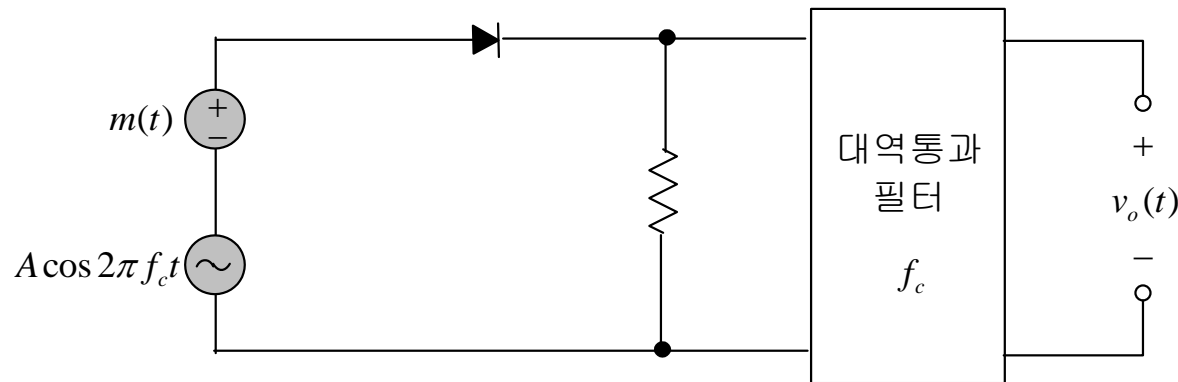
- 주기 $1/f_c$ 로 개폐를 반복하는 하는 스위치 동작에 의하여 $[A \cos(2\pi f_c t) + m(t)]$ 에 구형 펄스열을 곱한 효과를 얻는다.



DBS-TC 변조기

■ 스위치 변조기

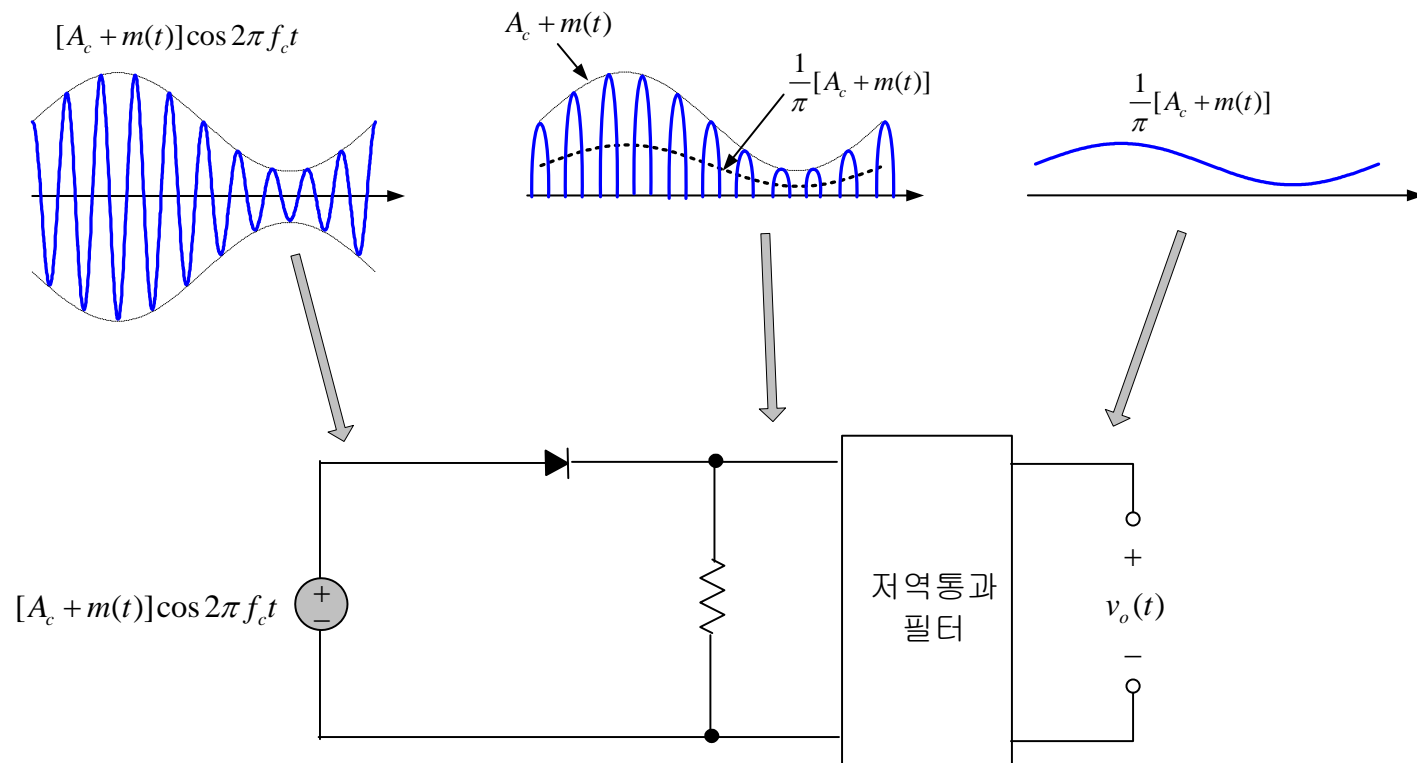
- $A \gg |m(t)|$ 인 경우 다이오드를 스위치 대신 사용할 수 있다.
- 이 조건이 만족되면 $A \cos(2\pi f_c t) + m(t) \cong A \cos(2\pi f_c t)$ 가 되어 다이오드가 $1/f_c$ 의 주기로 도통/불통이 반복되어 스위치 역할을 하게 된다.
- 이 구조를 사용하면 DSB-SC 변조기의 경우처럼 다이오드-브릿지를 사용하지 않고 한 개의 다이오드만 사용하여 구현할 수 있다.



DBS-TC 신호의 비동기 검파

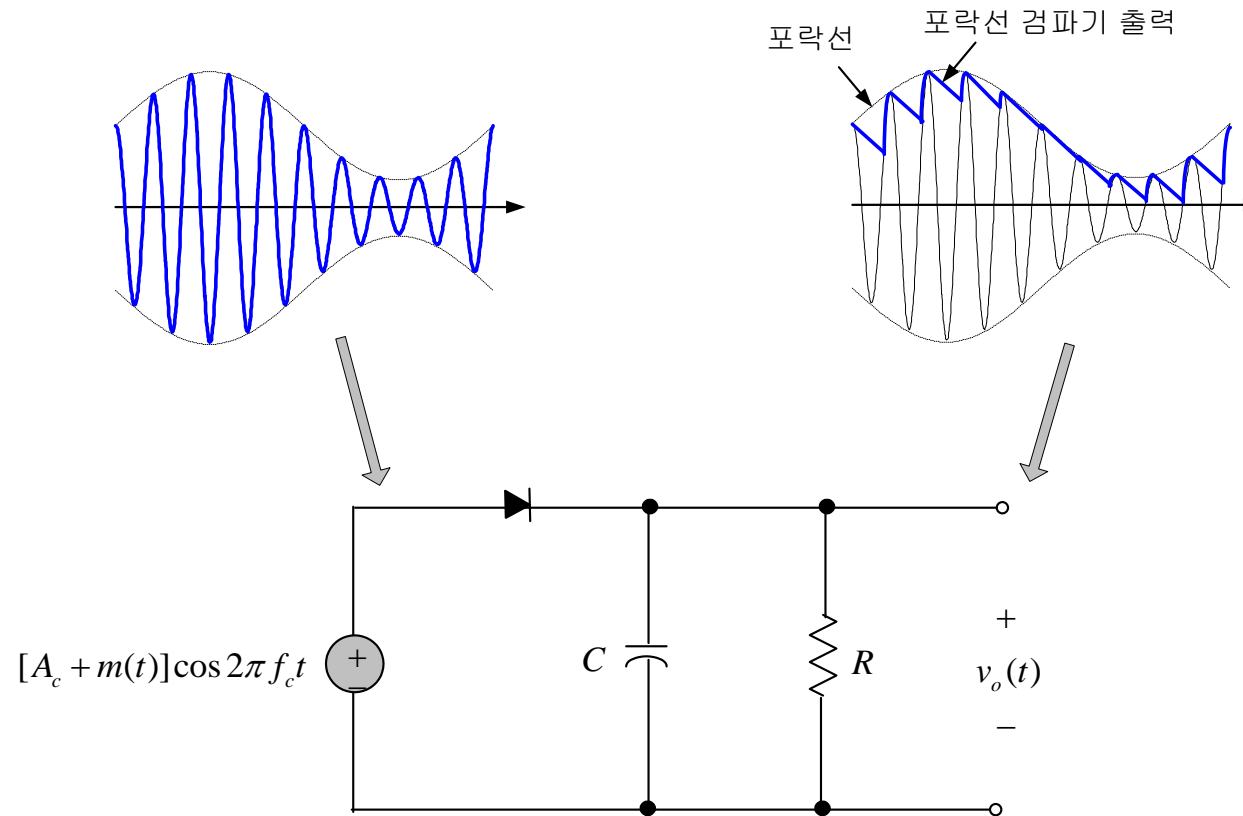
■ 정류 검파기(Rectifier Detector)

- AM 신호를 정류한 다음 저역통과 필터를 통하게 하는 방식



DBS-TC 신호의 비동기 검파

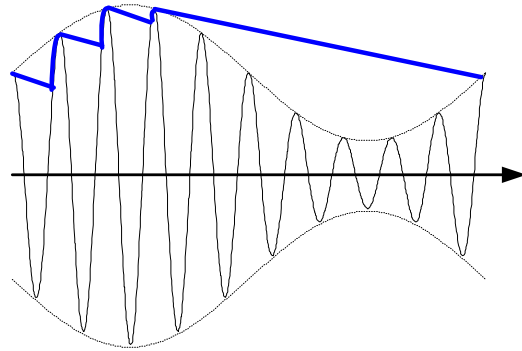
■ 포락선 검파기(Envelope Detector)



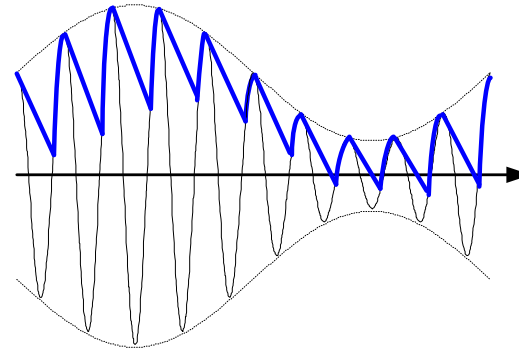
DBS-TC 신호의 비동기 검파

■ 포락선 검파기(Envelope Detector)

- 캐패시터의 방전 현상에 의해 출력은 입력 신호의 정확한 포락선이 아니라 ripple이 있는 파형을 만들어낸다.
- 따라서 방전 시정수 RC 의 값을 적절히 선택해야 한다.
- 포락선 검파기에서 시정수 선택이 부적합한 예



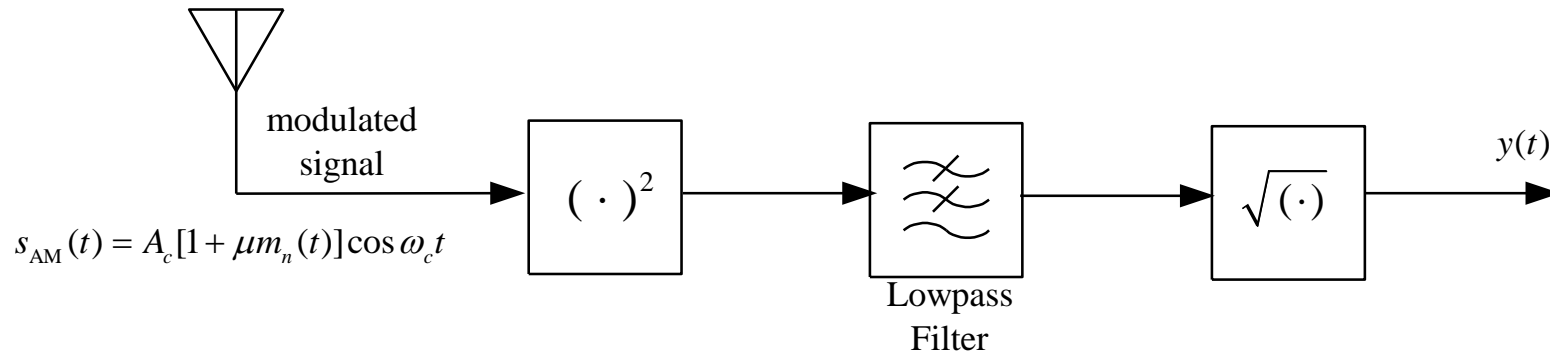
(a)



(b)

DSB-TC 신호의 비동기 검파

■ Square Law Detector



$$s_{AM}^2(t) = A_c^2[1 + \mu m_n(t)]^2 \cos^2 2\pi f_c t = \frac{1}{2}A_c^2[1 + \mu m_n(t)]^2 + \frac{1}{2}A_c^2[1 + \mu m_n(t)]^2 \cos 4\pi f_c t$$

$$y(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}A_c|1 + \mu m_n(t)| = \frac{1}{\sqrt{2}}|A_c + m(t)|$$

- DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)
- DSB-TC (Double Sideband Transmitted Carrier)
- **SSB (Single Sideband)**
- VSB (Vestigial Sideband)
- 반송파 추적
- 주파수 분할 다중화와 수퍼헤테로다인 수신기

단측파대 변조 (Single Sideband:SSB)



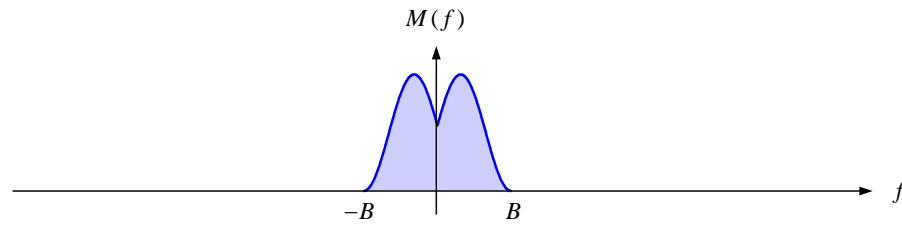
SSB

■ SSB 개요

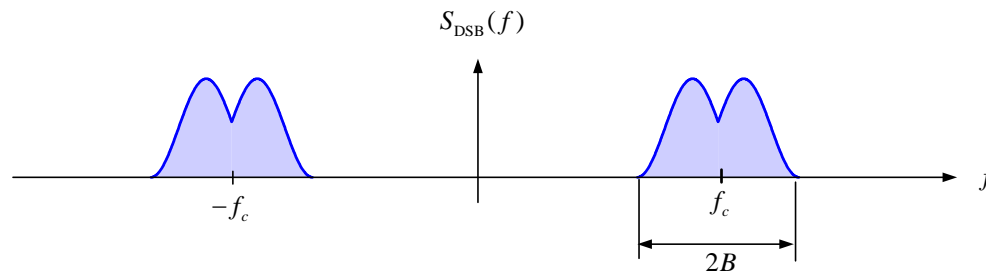
- 대역폭이 $B\text{Hz}$ 인 기저대역 신호를 DSB 변조(DSB-SC 또는 DSB-TC)하면 대역폭이 $2B\text{Hz}$ 로 기저대역 신호의 두 배가 된다.
- DSB 신호는 반송파를 중심으로 USB와 LSB의 두 개의 측파대를 가짐
- 실함수 $x(t)$ 의 푸리에 변환 $X(f)$ 는 $X(f) = X^*(-f)$ 이므로 DSB 신호의 두 개 측파대 중에서 어느 한 쪽만 전송해도 정보의 손실이 없다.
- 양측파대 중 한 쪽의 단측파대만 전송하는 방식을 단측파대(Single Side Band: SSB) 변조라 한다.
- SSB 전송을 위한 요구 대역폭은 기저대역 대역폭과 동일하게 $B\text{Hz}$
- 한정된 주파수 대역에서 두 배의 신호를 다중화하여 전송할 수 있다.
- SSB 신호의 복조는 DSB-SC와 같이 동기 검파기를 사용하면 된다.



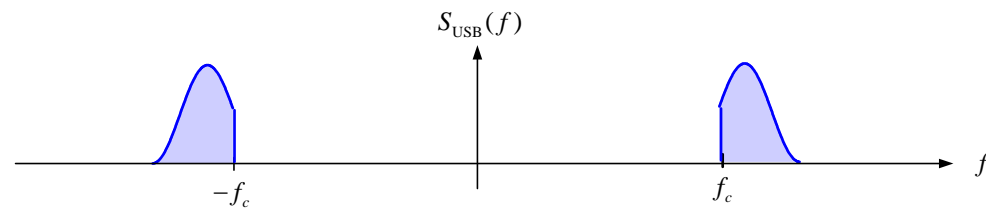
SSB



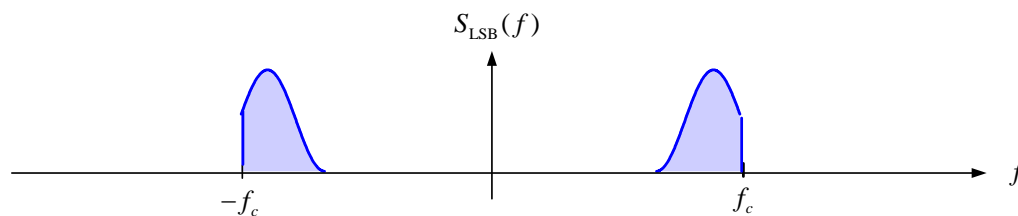
(a) Baseband



(b) DSB



(c) USB



(d) LSB

SSB 신호의 표현과 신호 발생

■ SSB 신호의 표현

- 메시지 신호가 단일 정현파라고 가정하면

$$m(t) = A_m \cos 2\pi f_m t$$

- 이 신호에 대한 DSB 신호는

$$s_{\text{DSB}}(t) = A_m \cos 2\pi f_m t \cdot \cos 2\pi f_c t = \frac{A_m}{2} \cos 2\pi(f_c - f_m)t + \frac{A_m}{2} \cos 2\pi(f_c + f_m)t$$

- SSB 신호는

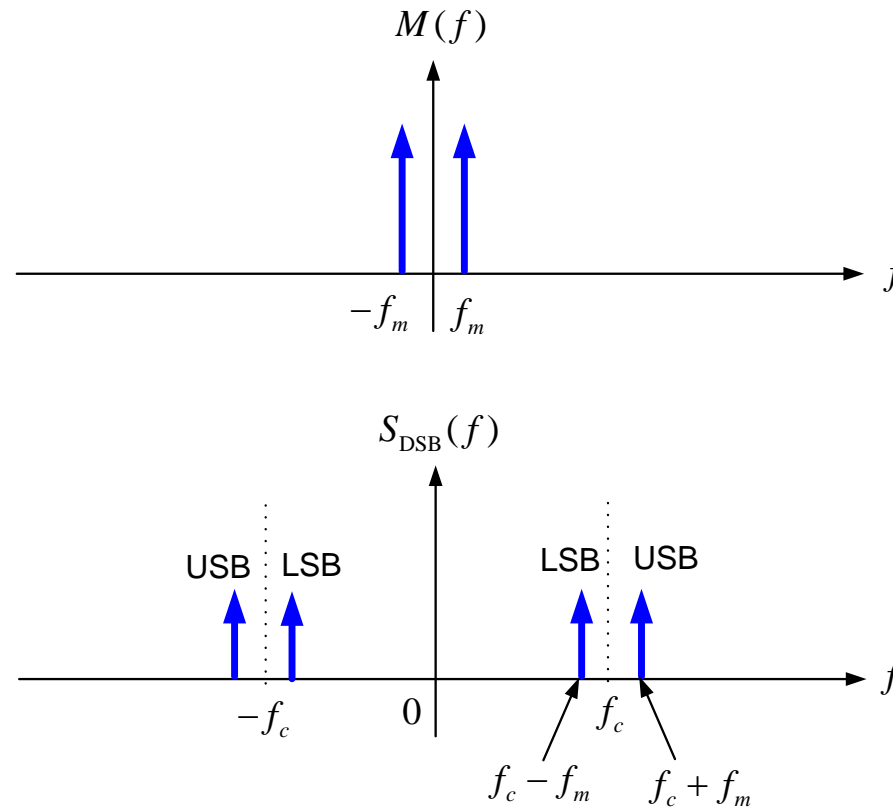
$$s_{\text{USB}}(t) = \frac{A_m}{2} \cos 2\pi(f_c + f_m)t$$

$$s_{\text{LSB}}(t) = \frac{A_m}{2} \cos 2\pi(f_c - f_m)t$$



SSB 신호의 표현과 신호 발생

■ SSB 신호의 스펙트럼 (단일 정현파의 경우)

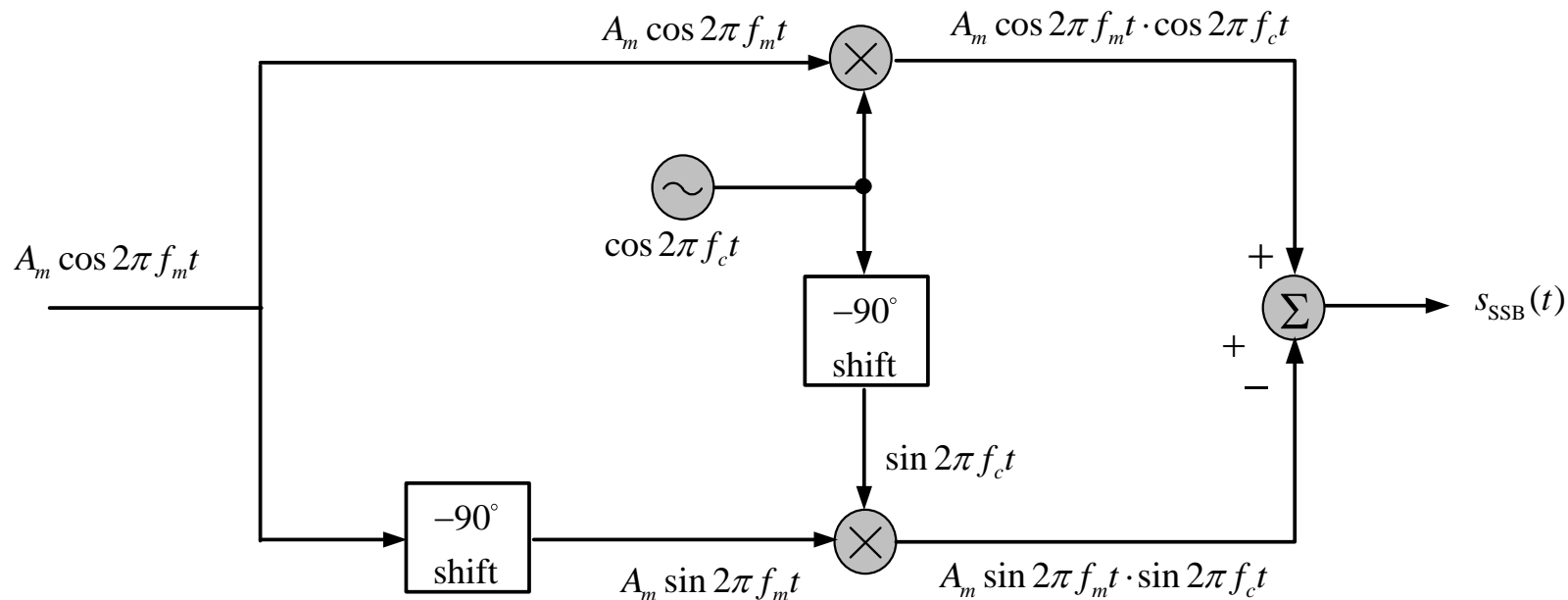


SSB 신호의 표현과 신호 발생

■ SSB 신호의 발생 (단일 정현파의 경우)

$$s_{\text{USB}}(t) = \frac{A_m}{2} \cos 2\pi(f_c + f_m)t = \frac{A_m}{2} \cos 2\pi f_m t \cdot \cos 2\pi f_c t - \frac{A_m}{2} \sin 2\pi f_m t \cdot \sin 2\pi f_c t$$

$$s_{\text{LSB}}(t) = \frac{A_m}{2} \cos 2\pi(f_c - f_m)t = \frac{A_m}{2} \cos 2\pi f_m t \cdot \cos 2\pi f_c t + \frac{A_m}{2} \sin 2\pi f_m t \cdot \sin 2\pi f_c t$$



SSB 신호의 표현과 신호 발생

■ 위상천이기와 힐버트 변환

- 위상 천이기의 전달함수

$$H(f) = -j \operatorname{sgn}(f) = \begin{cases} -jf > 0 \\ jf < 0 \end{cases}$$

- 극좌표 형식으로 표현하면

$$H(f) = |H(f)|e^{j\theta(f)} = \begin{cases} 1 \cdot e^{-j90^\circ} & f > 0 \\ 1 \cdot e^{j90^\circ} & f < 0 \end{cases}$$

- 임펄스 응답은

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}[-j \operatorname{sgn}(f)] = \frac{1}{\pi t}$$



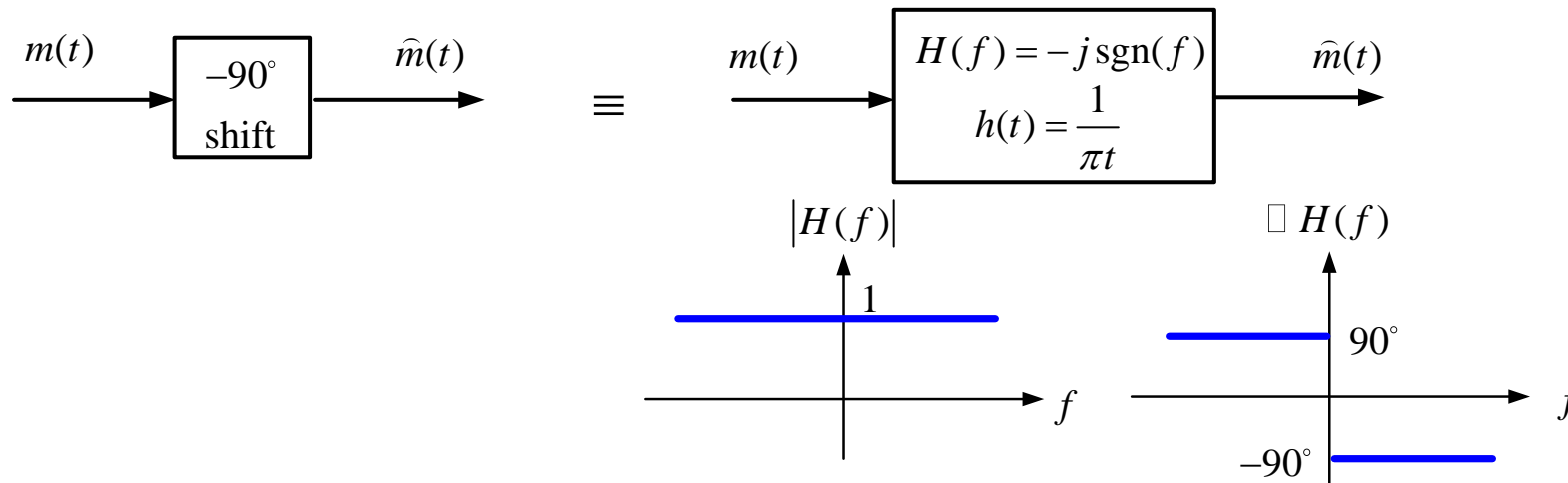
SSB 신호의 표현과 신호 발생

■ 위상천이기와 힐버트 변환

- 위상 천이기에 입력 $m(t)$ 가 들어오는 경우 출력 신호와 출력의 스펙트럼을 표현하면

$$\hat{m}(t) = h(t) * m(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{m(\tau)}{t - \tau} d\tau : \text{Hilbert Transform}$$

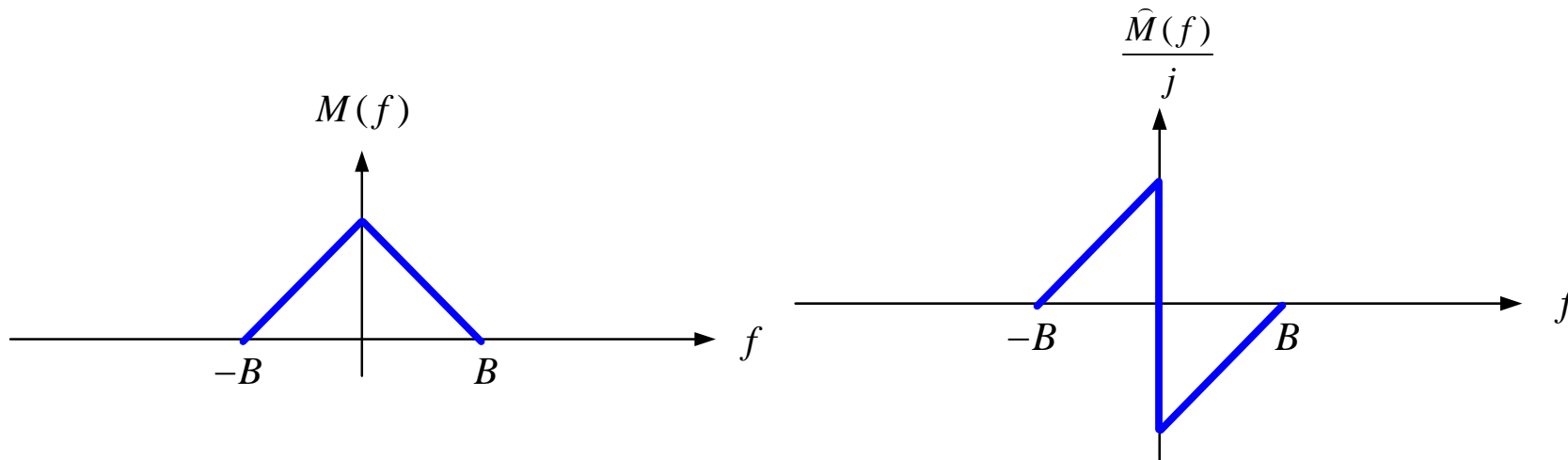
$$\hat{M}(f) = H(f)M(f) = \begin{cases} -jM(f) & f > 0 \\ jM(f) & f < 0 \end{cases}$$



SSB 신호의 표현과 신호 발생

■ 위상천이기와 힐버트 변환

$$\frac{\hat{M}(f)}{j} = \begin{cases} -M(f) & f > 0 \\ M(f) & f < 0 \end{cases}$$

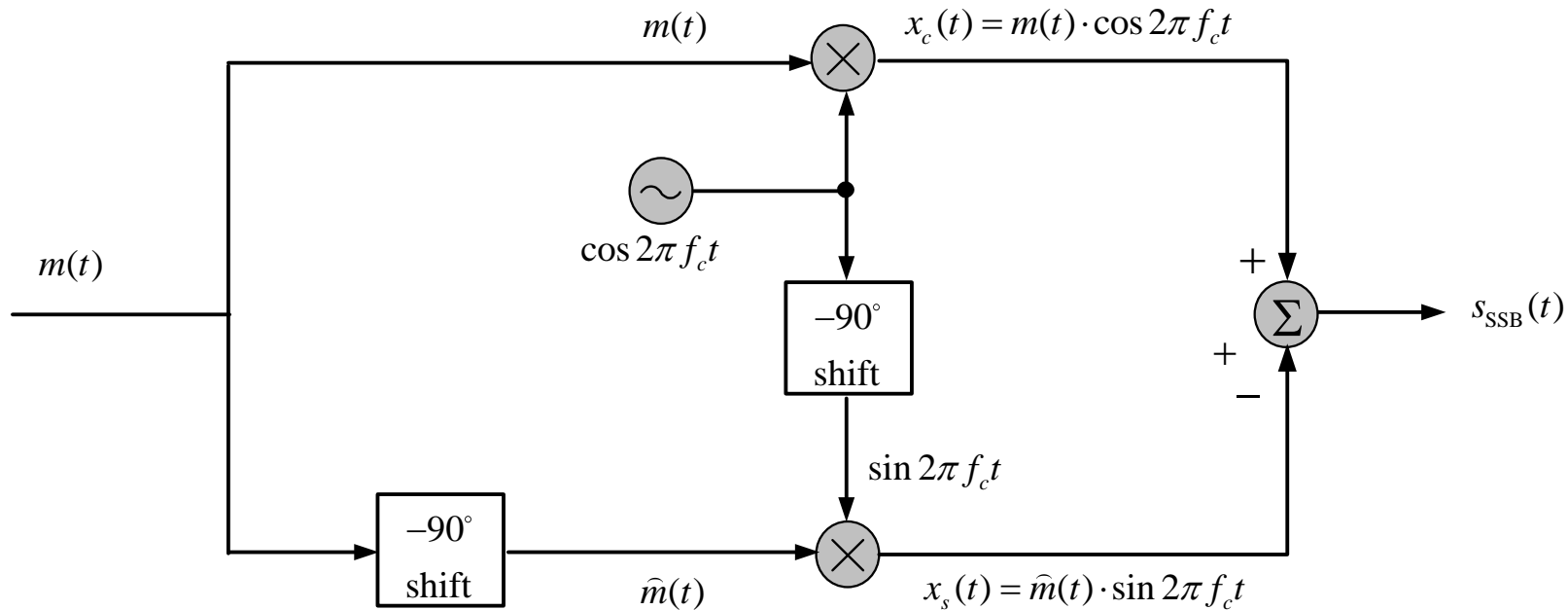


SSB 신호의 표현과 신호 발생

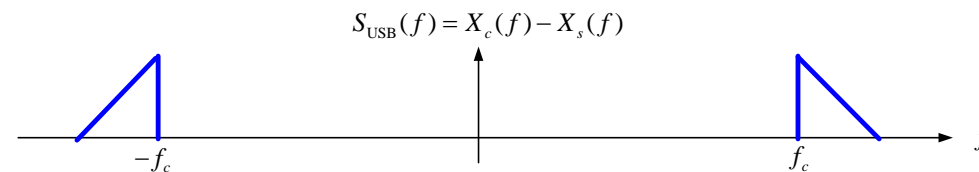
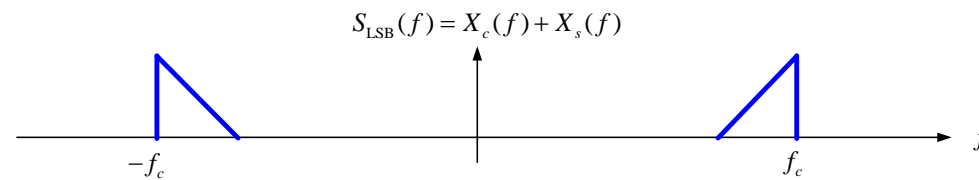
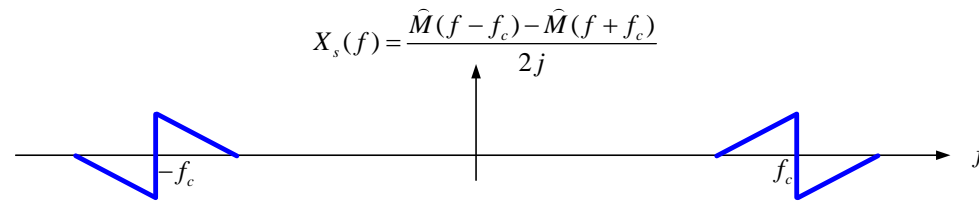
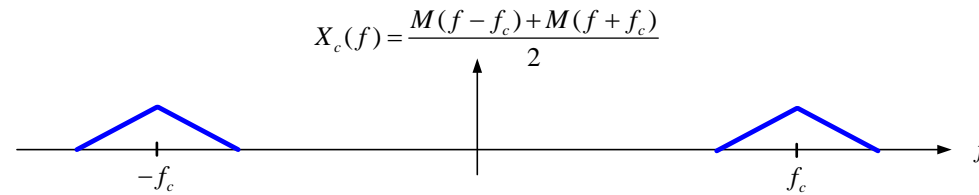
■ SSB 신호의 발생 (일반적인 신호의 경우)

$$X_c(f) = \mathcal{F}\{m(t) \cos 2\pi f_c t\} = \frac{M(f - f_c) + M(f + f_c)}{2}$$

$$X_s(f) = \mathcal{F}[\hat{m}(t) \sin 2\pi f_c t] = \frac{\hat{M}(f - f_c) - \hat{M}(f + f_c)}{2j}$$



SSB 신호의 표현과 신호 발생



SSB 신호의 표현과 신호 발생

- 요약: SSB 신호의 표현

$$s_{\text{SSB}+}(t) \triangleq s_{\text{USB}}(t) = m(t) \cos 2\pi f_c t - \hat{m}(t) \sin 2\pi f_c t$$

$$s_{\text{SSB}-}(t) \triangleq s_{\text{LSB}}(t) = m(t) \cos 2\pi f_c t + \hat{m}(t) \sin 2\pi f_c t$$



SSB 변조기

■ 필터 방법(Frequency Discrimination)

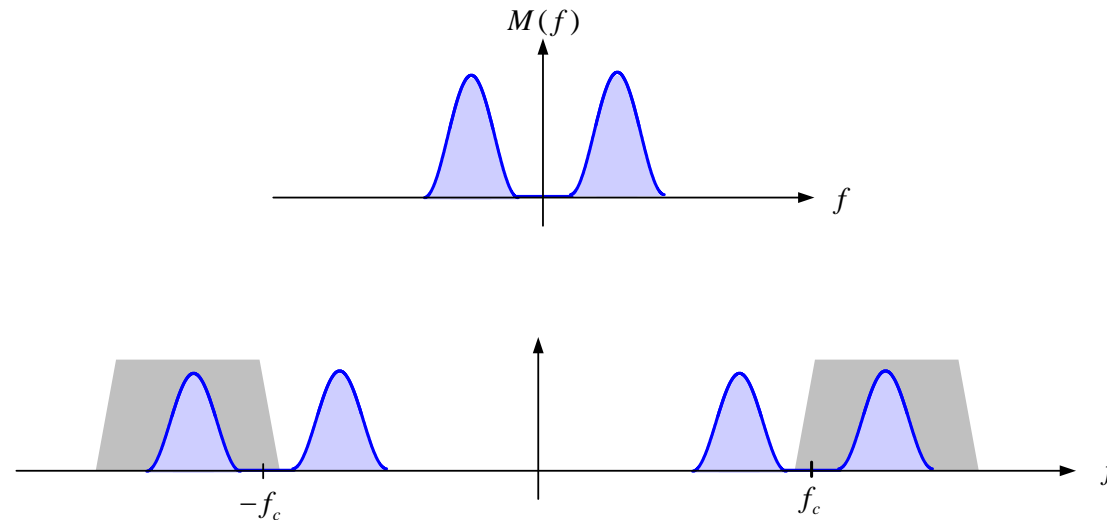
- DSB-SC 신호를 발생시킨 후 필터를 사용하여 DSB 스펙트럼 중 한 쪽 단측파대만 선택하는 방법
- 서로 붙어있는(보호대역 없이) 두 개의 측파대 중 하나만 택하는 것이므로 매우 정교한(빠른 감쇠 특성을 가진) 필터를 필요로 한다는 것이 단점이다.
- USB 신호를 얻고자 하는 경우 f_c 이상의 성분은 완벽히 통과시키고 f_c 이하의 성분은 완벽히 제거시켜야 한다.
- 그러나 이러한 결과를 얻기 위해서는 이상적인 필터가 필요하며 따라서 실현 불가능하다.



SSB 변조기

■ 필터 방법(Frequency Discrimination)

- 특히 정보 신호가 직류에 가까운 저주파 성분을 많이 가지고 있다면 f_c 근처에서의 필터의 부정확성에 따른 영향이 상당히 크게 된다.
- 만일 메시지 신호가 그림과 같이 0에 가까운 주파수 성분이 무시할 정도로 작다면(결과적으로 DSB 신호가 f_c 근처의 성분이 무시할 정도라면) 날카롭지 않은 필터를 사용해도 큰 문제가 되지 않는다.



SSB 변조기

■ 필터 방법(Frequency Discrimination)

- 음성의 경우 스펙트럼을 보면 300 Hz 이하의 주파수 성분은 거의 없기 때문에 필터를 이용한 음성 신호의 SSB 변조는 비교적 쉽다.
- 그러나 음악은 보통 50 Hz의 낮은 주파수 성분까지 포함하므로 SSB는 음악을 전송하는 방송용으로는 사용되지 않고 주로 음성 위주의 통신용으로만 사용된다.
- 이와 같이 SSB 방식은 방송용 AM과는 달리 통신용이므로 방송용에 비해 송신기의 출력 전력이 매우 낮은 편이다.
- SSB 변조를 위한 필터는 빠른 감쇠 특성을 가져야 하므로 필터의 Q factor가 매우 높아야 한다.
 - Q 값이 보통 수십에 불과한 LC 필터로는 구현이 어렵고 주로 crystal filter가 사용된다.
 - 수정 필터로는 100,000에 이르는 Q 값을 얻을 수 있으나 일단 제작된 후에는 사양을 변경할 수 없으므로 가변 동조와 같은 기능을 가질 수 없다.



SSB 변조기

■ 위상천이 방법(Phase Discrimination)

- 위상천이기를 통하여 Hilbert 변환한 신호를 이용하여 원하지 않는 주파수 성분을 상쇄시키는 방법
- 변조기 구조는 두 개의 DSB 변조기와 위상천이기를 포함하고 있다.
- 위상 천이를 이용한 SSB 변조는 필터가 필요 없다는 장점이 있는 반면에 메시지 신호 $m(t)$ 에 대한 -90° 위상 천이를 구현하는데 문제가 있다.
- 한 개의 주파수 성분만 가진 신호를 -90° 위상 천이하는 것은 쉬운 일이지만 일반적인 신호 $m(t)$ 의 모든 주파수 성분에 대해 동일하게 -90° 위상 천이하는 것은 불가능한 일이다.



SSB 변조기

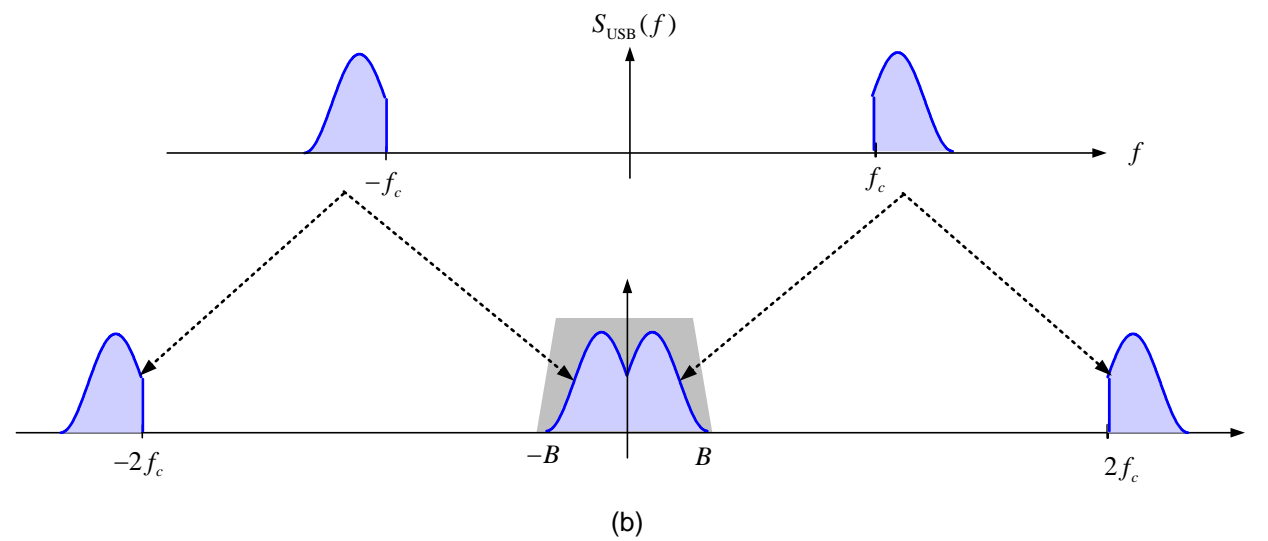
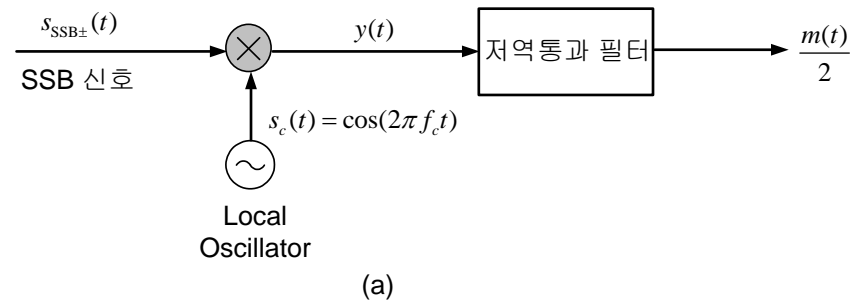
■ 위상천이 방법(Phase Discrimination)

- 만일 메시지 신호 $m(t)$ 가 대역폭이 좁은 신호라면 -90° 위상 천이를 어느 정도 근사적으로 구현할 수 있다.
- 음성 신호는 대역폭이 3~4 KHz로 비교적 좁기 때문에 이 방법을 사용하여 SSB 변조가 가능하지만 텔레비전 영상 신호는 대역폭이 6 MHz로 상당히 넓기 때문에 이 방법을 사용할 수 없다.
- 또한 TV 영상 신호는 직류 성분을 가지고 있기 때문에 필터 방법을 사용하는 것도 문제가 된다.
- 결국 TV 영상 신호는 SSB 변조를 사용하는 것이 현실적으로 불가능하며, 뒤에 나오는 VSB 변조 방식을 사용한다.



SSB 신호의 복조

■ 동기식 복조



SSB 신호의 복조

■ 동기식 복조

- SSB 신호

$$s_{SSB_{\pm}}(t) = m(t) \cos 2\pi f_c t \mp \hat{m}(t) \sin 2\pi f_c t$$

- 수신기 국부 발진기가 주파수 및 위상에서 반송파와 정확히 동기되었다고 가정하면 혼합기 출력은

$$s_{SSB_{\pm}}(t) \cos 2\pi f_c t = [m(t) \cos 2\pi f_c t \mp \hat{m}(t) \sin 2\pi f_c t] \cos 2\pi f_c t = \frac{1}{2}m(t) + \frac{1}{2}m(t) \cos 4\pi f_c t \mp \frac{1}{2}\hat{m}(t) \sin 4\pi f_c t$$

- 즉 기저대역 신호와 $2f_c$ 주파수의 SSB 신호의 합으로 표현된다.
- 저역통과 필터에 통과하면 원하는 신호를 얻을 수 있다.



SSB 신호의 복조

■ 반송파 동기화 오차의 영향

- 수신기 국부 발진기의 주파수와 위상이 실제 반송파와 각각 Δf 와 $\Delta \theta$ 만큼 차이가 있다고 하자. 혼합기의 출력은

$$\begin{aligned} s_{SSB\pm}(t) \cos[2\pi(f_c + \Delta f)t + \Delta\theta] &= [m(t) \cos 2\pi f_c t \mp \hat{m}(t) \sin 2\pi f_c t] \cos[2\pi(f_c + \Delta f)t + \Delta\theta] \\ &= \frac{1}{2}m(t)\{\cos(2\pi\Delta f t + \Delta\theta) + \cos[2\pi(2f_c + \Delta f)t + \Delta\theta]\} \mp \frac{1}{2}\hat{m}(t)\{\sin(2\pi\Delta f t + \Delta\theta) - \sin[2\pi(2f_c + \Delta f)t + \Delta\theta]\} \end{aligned}$$

- 저역통과 필터를 통한 신호는

$$y(t) = \frac{1}{2}m(t) \cos(2\pi\Delta f t + \Delta\theta) \mp \frac{1}{2}\hat{m}(t) \sin(2\pi\Delta f t + \Delta\theta)$$



SSB 신호의 복조

■ 반송파 동기화 오차의 영향

- 위상 오차의 영향을 알아보기 위하여 $\Delta f = 0$ 으로 하면

$$y(t) = \frac{1}{2}m(t)\cos\Delta\theta \mp \frac{1}{2}\hat{m}(t)\sin\Delta\theta$$

- 첫 번째 항은 원하는 신호 성분으로 DSB-SC의 결과와 동일하다. 위상 오차가 커져서 90° 에 가까워질수록 원하는 신호 성분이 작아진다.
- 두 번째 항에서 $\hat{m}(t)$ 의 스펙트럼이 $m(t)$ 와 동일한 대역을 차지하므로 필터를 사용하여 이 성분을 제거하는 것은 불가능하다.
- 사람의 귀는 신호의 크기에 민감하며 위상에 대해서는 상대적으로 둔감하다. 따라서 $m(t)$ 와 진폭 스펙트럼이 동일한 $\hat{m}(t)$ 는 귀에는 크게 거슬리지 않으므로 음성 전송의 경우 큰 지장을 주지는 않는다.
- 한편 사람의 눈은 신호의 크기보다 위상에 민감하기 때문에 영상 신호의 전송에서는 SSB 방식을 사용하는데 한계가 있다.



SSB 신호의 복조

■ 반송파 동기화 오차의 영향

- 주파수 오차의 영향을 알아보기 위해 $\Delta\theta = 0$ 으로 하면

$$y(t) = \frac{1}{2}m(t)\cos(2\pi\Delta ft) \mp \frac{1}{2}\hat{m}(t)\sin(2\pi\Delta ft)$$

- 즉 주파수 오차는 원하는 신호를 주파수 Δf 의 반송파로 SSB 변조한 것과 같다.
- 결과적으로 원하는 출력 신호의 스펙트럼이 Δf 만큼 이동되고 $\hat{m}(t)$ 성분에 의한 위상 왜곡의 효과로 나타난다.



- DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)
- **DSB-TC (Double Sideband Transmitted Carrier)**
- SSB (Single Sideband)
- VSB (Vestigial Sideband)
- 반송파 추적
- 주파수 분할 다중화와 수퍼헤테로다인 수신기

잔류측파대 변조 (Vestigial Sideband :VSB)



VSB

■ VSB 개요

- SSB 방식은 DSB-SC나 AM에 비해 절반의 대역폭만 사용하므로 주파수 자원의 활용도가 높다는 장점이 있다. 그러나 송신기와 수신기의 구성이 매우 복잡하다는 단점이 있다.
- 필터 방법에 의한 SSB 변조는 직류 성분이 없을 때만 가능하고 날카로운 차단 특성을 가진 필터가 필요하다.
 - 진폭 특성이 이상적인 필터에 가까울수록 필터의 위상 특성이 나빠져서 리플이 발생한다.
 - 따라서 메시지 신호에서 저주파 성분을 무시할 수 없는 경우 SSB 신호 발생에 어려움이 있다.
- 위상 천이를 사용한 SSB 변조에서는 정확한 위상천이기를 구현할 수 없고 협대역 신호에 한해 근사화만 가능하다.



VSB

■ VSB 개요

- SSB는 수신기에서도 반송파 복원에서 오차가 있는 경우 DSB-SC에서보다 더 큰 영향을 받음
- TV 영상 신호와 같이 대역폭이 4.5 MHz에 이르는 경우 많은 방송국을 할당하기 위해서는 대역폭 효율이 좋은 변조방식이 선호됨
 - 이 경우 SSB가 가장 선호되는 변조 방식일 수 있지만 영상 신호는 직류 성분을 가지고 있을 뿐만 아니라 광대역이어서 SSB 신호를 만드는데 필터 방법이나 위상 천이 방법 어느 것도 현실적으로 불가능하다.
- SSB 방식과 AM 방식을 절충한 방식이 잔류측파대(Vestigial Side Band:VSB) 변조 방식이다.



VSB

■ VSB 개요

- VSB 방식은 SSB 방식의 대역폭 절감과 AM 방식의 송수신기 단순성을 추구하고 있음
- VSB 신호는 SSB에 비해 간단히 만들 수 있고, 대역폭은 SSB에 비하여 조금 넓게(일반적으로 25%~33% 정도 많게) 사용
- VSB 변조 방식은 TV 방송이나 팩시밀리 등에서 사용



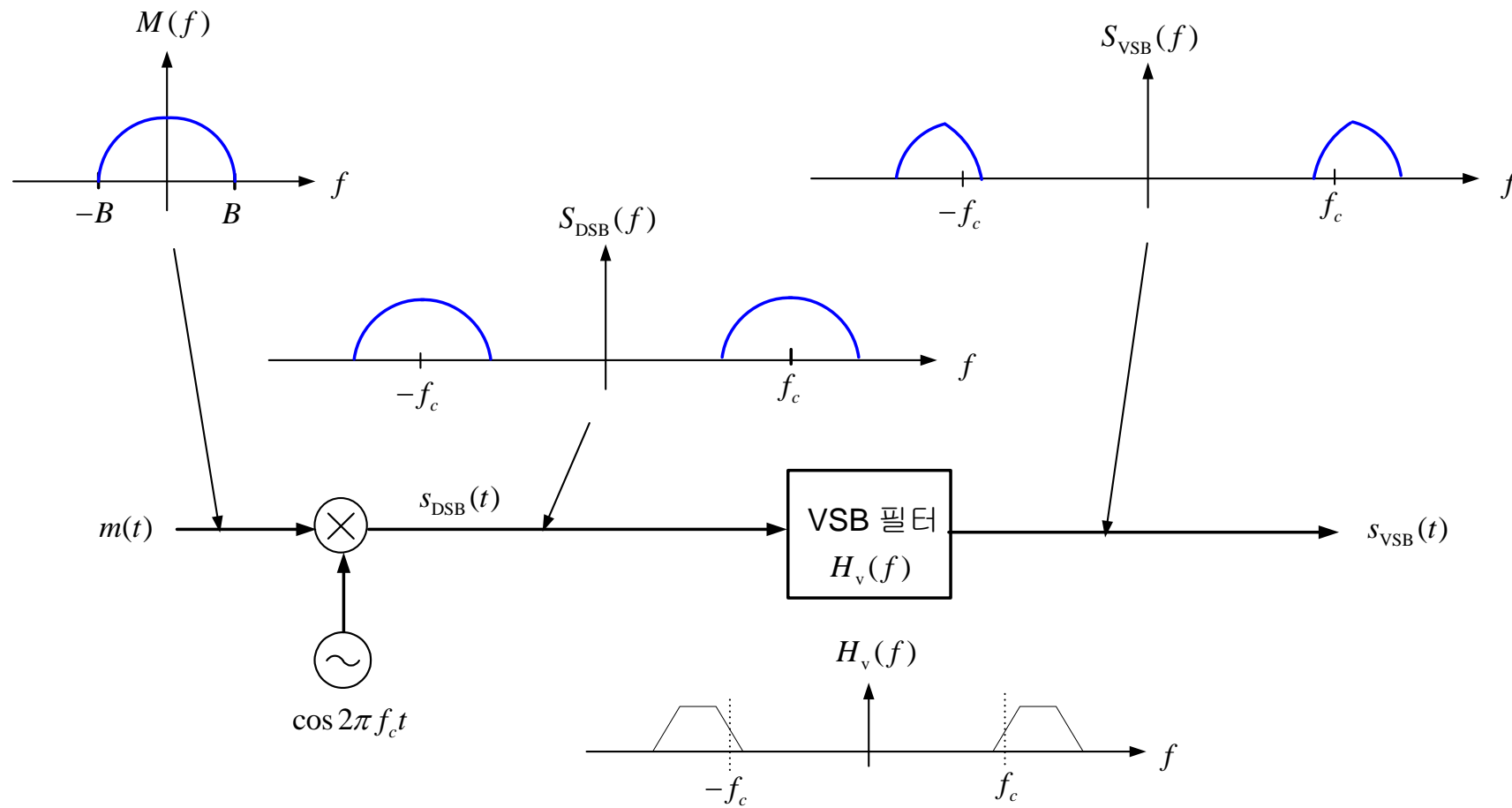
VSB

■ VSB 신호의 발생

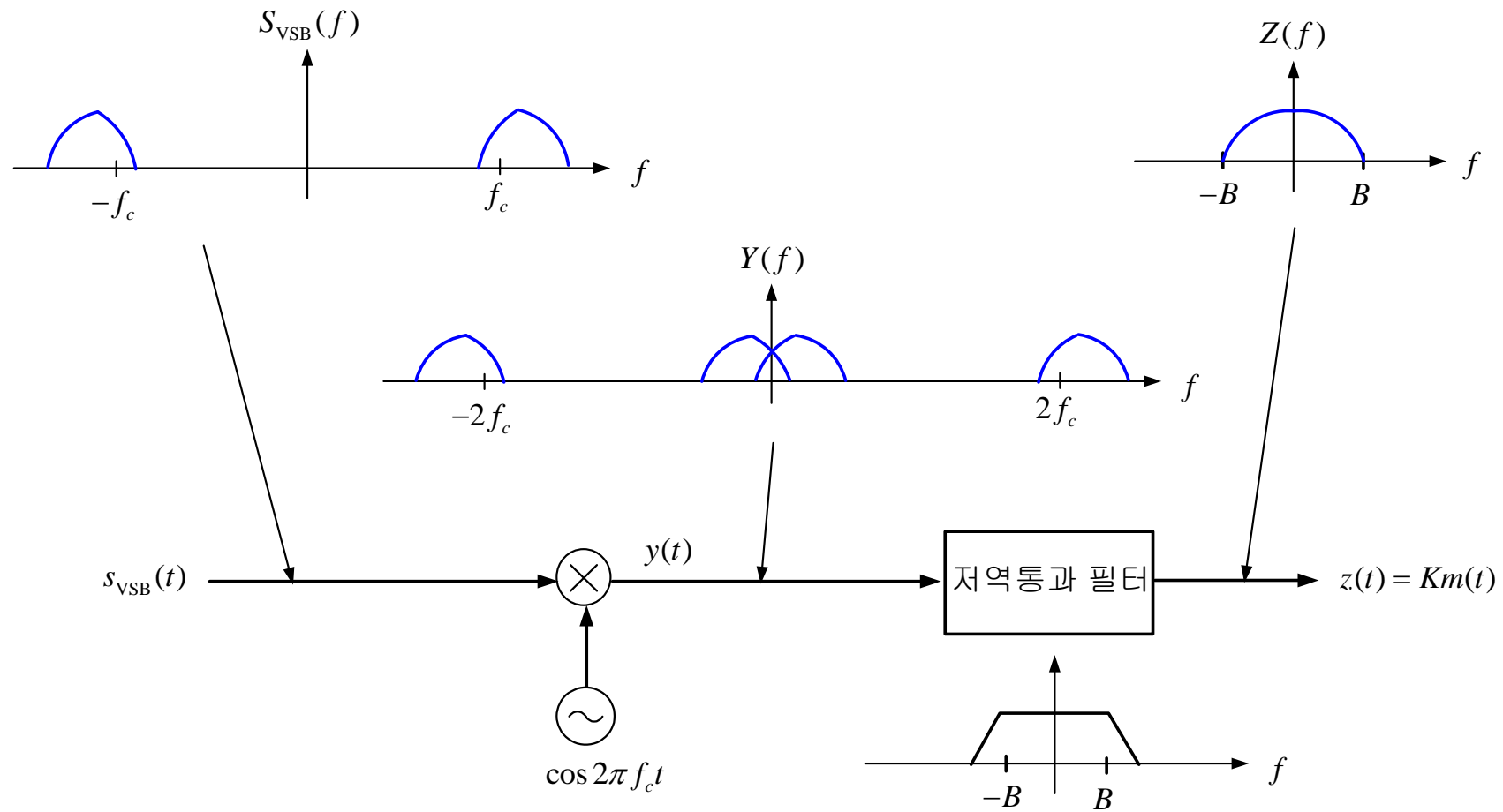
- VSB 방식에서는 양측파대 중 원하지 않는 측파대를 완전히 제거하지 않고 일부를 잔류시켜 원하는 측파대와 함께 전송한다.
- 원하지 않는 측파대를 완벽히 제거하지 않으므로 필터의 설계 조건이 까다롭지 않다.
- 원하는 측파대도 완전한 모양 그대로 전송하는 것이 아니라 반송파 근처의 주파수 성분은 감쇄시켜 전송한다. 즉 원하는 측파대의 주파수 성분도 일부 왜곡이 발생한다.
- 이렇게 함으로써 송신기 필터의 구현이 쉬워지지만 원하는 측파대의 신호가 일부 손상되므로 수신기에서 정보 신호를 정확히 복구하지 못할 가능성이 있다.
- 그러나 필터를 잘 설계하면 송신단의 왜곡을 보상하여 원하는 정보 신호를 복구할 수 있다.



VSB 변조



VSB 복조



VSB 필터의 조건

- 송신기의 VSB 신호

$$S_{\text{VSB}}(f) = H_v(f)S_{\text{DSB}}(f) = \frac{1}{2}H_v(f)[M(f + f_c) + M(f - f_c)]$$

- 동기 검파 수신기에서 VSB 신호에 반송파를 곱하면 신호의 스펙트럼은

$$\begin{aligned}\mathcal{F}[s_{\text{VSB}}(t) \cos 2\pi_c t] &= \frac{1}{2}S_{\text{VSB}}(f + f_c) + \frac{1}{2}S_{\text{VSB}}(f - f_c) \\ &= \frac{1}{4}H_v(f + f_c)[M(f + 2f_c) + M(f)] + \frac{1}{4}H_v(f - f_c)[M(f - 2f_c) + M(f)]\end{aligned}$$

- LPF를 통과하면

$$\{\mathcal{F}[s_{\text{VSB}}(t) \cos 2\pi_c t]\}_{\text{LPF}} = \frac{1}{4}H_v(f + f_c)M(f) \leftrightarrow + \frac{1}{4}H_v(f - f_c)M(f) = \frac{1}{4}M(f)[H_v(f + f_c) + H_v(f - f_c)]$$



VSB 필터의 조건

- 메시지 신호의 대역폭 내에서 $H_v(f + f_c) + H_v(f - f_c)$ 가 일정하다면, 즉 VSB 필터가

$$H_v(f + f_c) + H_v(f - f_c) = K = \text{상수} \quad |f| \leq B$$

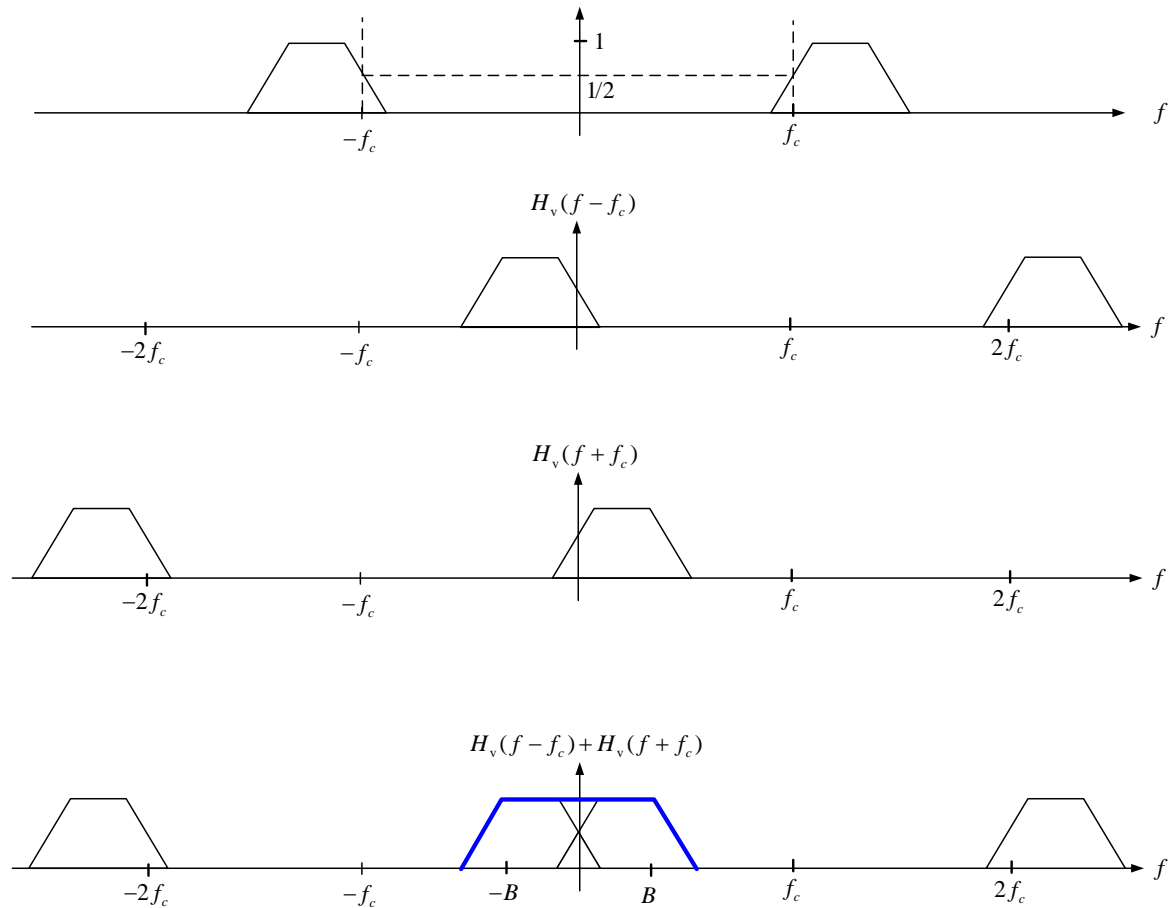
의 조건을 만족한다면 저역통과 필터의 출력은 원하는 기저대역 신호에 비례하여 복조가 정확히 이루어진다.

- VSB 필터의 예

$$\left[H_v(f - f_c) - \frac{K}{2} \right] = - \left[H_v(f + f_c) - \frac{K}{2} \right] \quad |f| \leq B$$
$$H_v(f_c) = \frac{K}{2}$$



VSB 필터의 조건

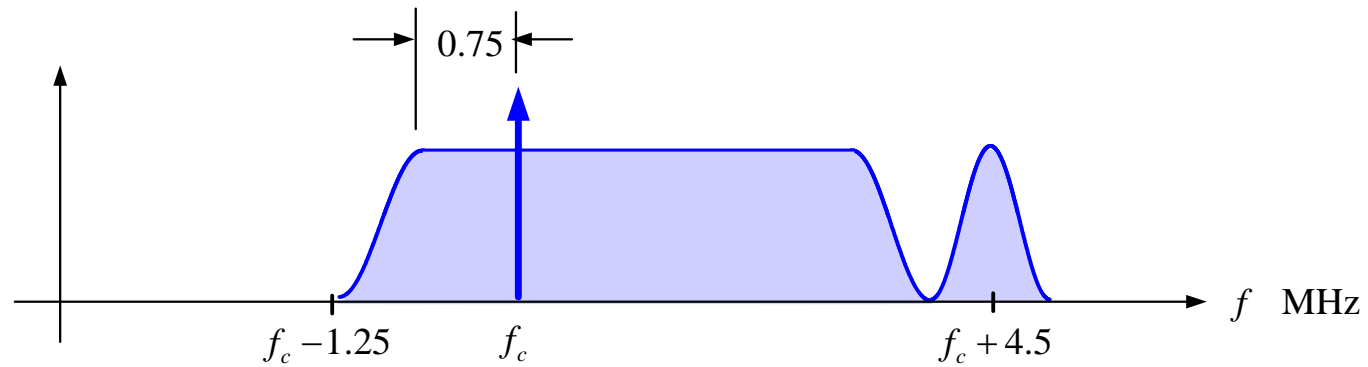


VSB 필터의 조건

- TV의 영상 신호는 4MHz 정도의 대역폭을 차지한다. 따라서 DSB 변조를 사용하면 영상만 전송하는데 약 8MHz의 대역폭이 필요하다.
- 주파수 활용도를 높이기 위하여 SSB 변조를 사용하면 좋겠지만 현실적으로 문제점이 여러 가지 있다.
 - 영상 신호는 저주파대에 많은 정보가 담겨 있어서 필터 방법을 사용한 SSB 신호 발생이 매우 어렵다. 날카로운 차단 특성의 필터가 필요한데, 진폭 특성이 이상적인 필터에 가까울수록 선형 위상의 구현이 어렵다. 위상 왜곡이 발생하면 영상에서는 큰 결함이 된다.
 - 또한 영상 신호는 광대역이므로 모든 주파수 성분에 대해 일정하게 위상을 천이시키는 장치의 구현이 불가능하므로 위상 천이 방법을 사용한 SSB 신호의 발생도 문제가 있다.
- 따라서 TV에서는 DSB와 SSB의 절충 방식인 VSB를 사용하여 6MHz의 대역에 영상과 오디오를 실어서 전송한다.

VSB 필터의 조건

■ TV 신호의 스펙트럼

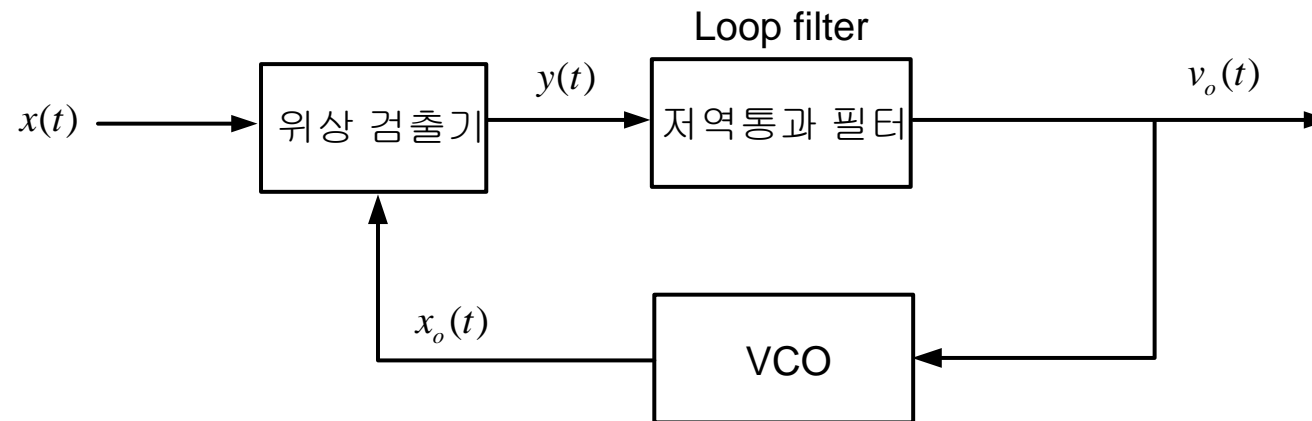


- DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)
- DSB-TC (Double Sideband Transmitted Carrier)
- SSB (Single Sideband)
- VSB (Vestigial Sideband)
- **반송파 추적**
- 주파수 분할 다중화와 수퍼헤테로다인 수신기



PLL과 AM 신호의 동기 검파(I)

- Phase Locked Loop (PLL)의 구성
 - 위상 검출기(또는 위상 비교기)
 - 저역통과 필터(또는 루프 필터)
 - 전압제어 발진기(Voltage Controlled Oscillator:VCO)

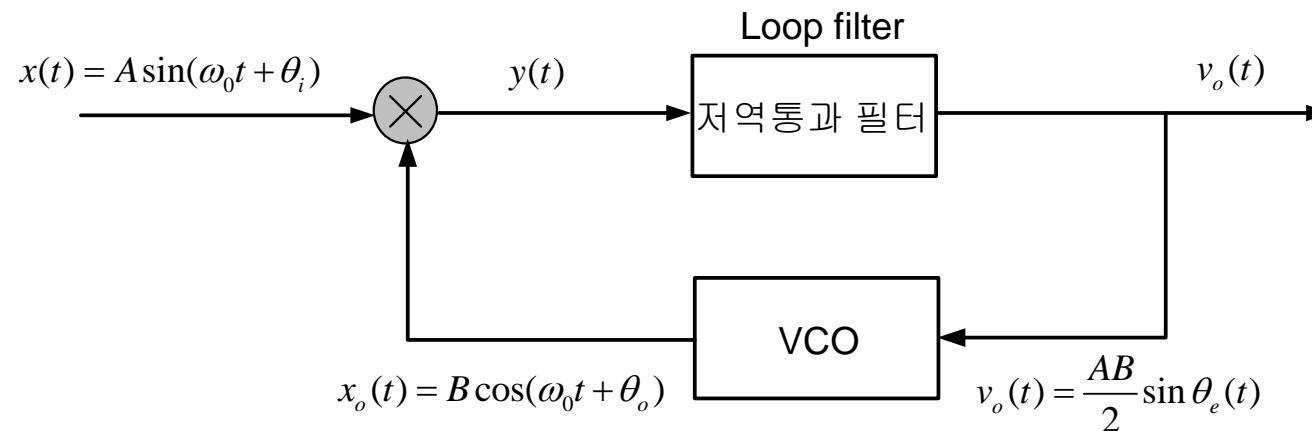


PLL과 AM 신호의 동기 검파(2)

■ PLL의 동작(Analog PLL)

- PLL 입력을 $x(t) = A \sin(\omega_0 t + \theta_i)$ 라 하고 VCO 출력을 $x_o(t) = B \cos(\omega_0 t + \theta_o)$ 라 하자.
- 곱셈기의 출력 $y(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$y(t) = AB \sin(\omega_0 t + \theta_i) \cos(\omega_0 t + \theta_o) = \frac{AB}{2} [\sin(\theta_i - \theta_o) + \sin(2\omega_0 t + \theta_i + \theta_o)]$$



PLL과 AM 신호의 동기 검파(3)

■ PLL의 동작

- 마지막 항은 저역통과 필터에 의해 제거되어 VCO의 입력 $v_o(t)$ 는 다음과 같이 된다.

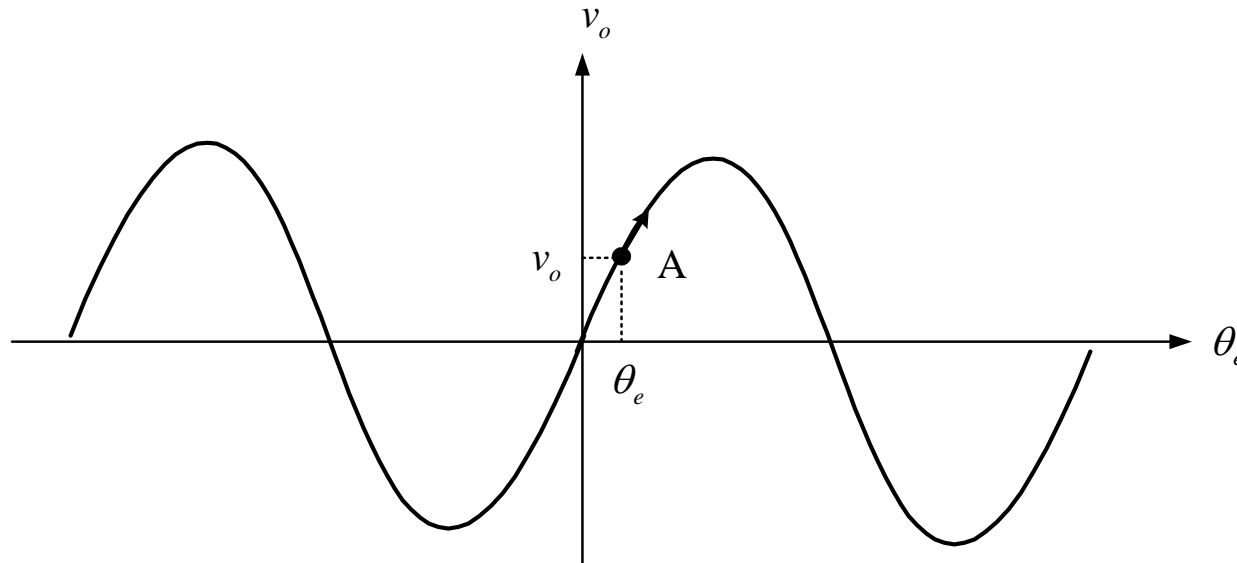
$$v_o(t) = \frac{AB}{2} \sin \theta_e(t), \theta_e(t) \triangleq \theta_i(t) - \theta_o(t)$$

- 여기서 $\theta_e(t)$ 는 위상 에러이다.



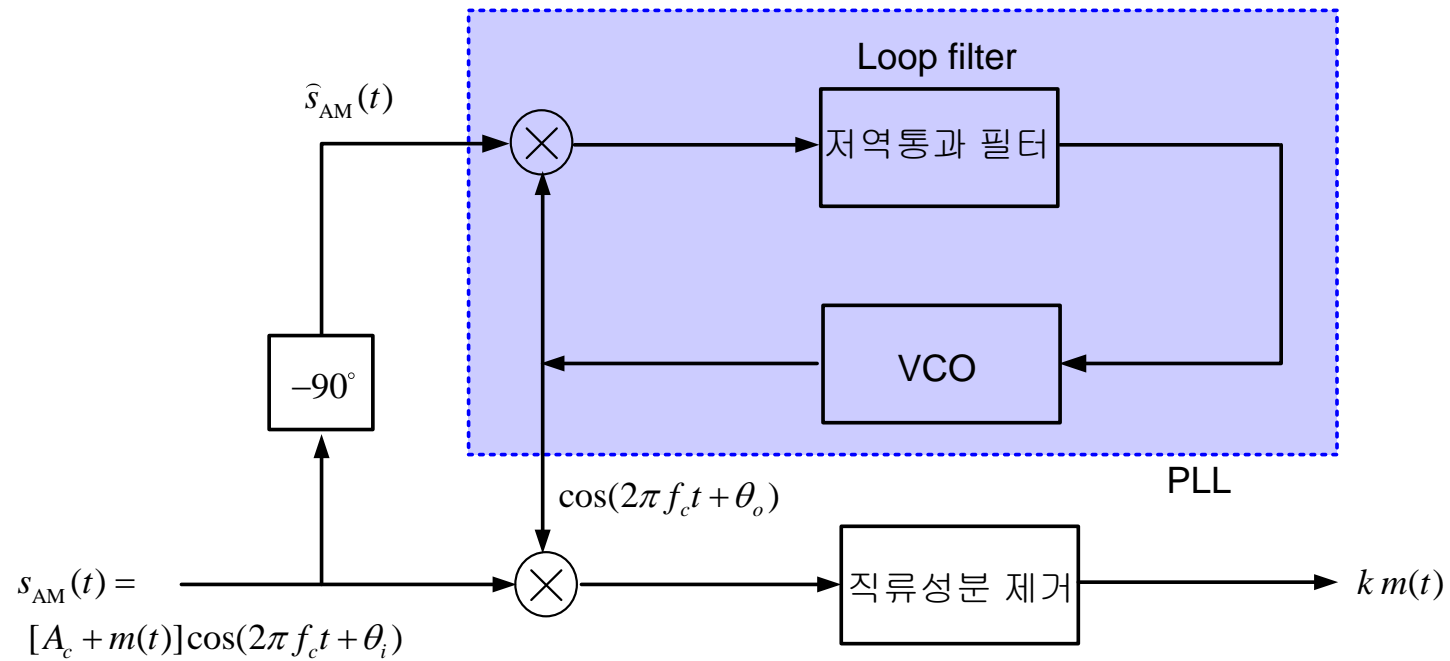
PLL과 AM 신호의 동기 검파(4)

- PLL의 동작
 - v_o 와 θ_e 의 관계



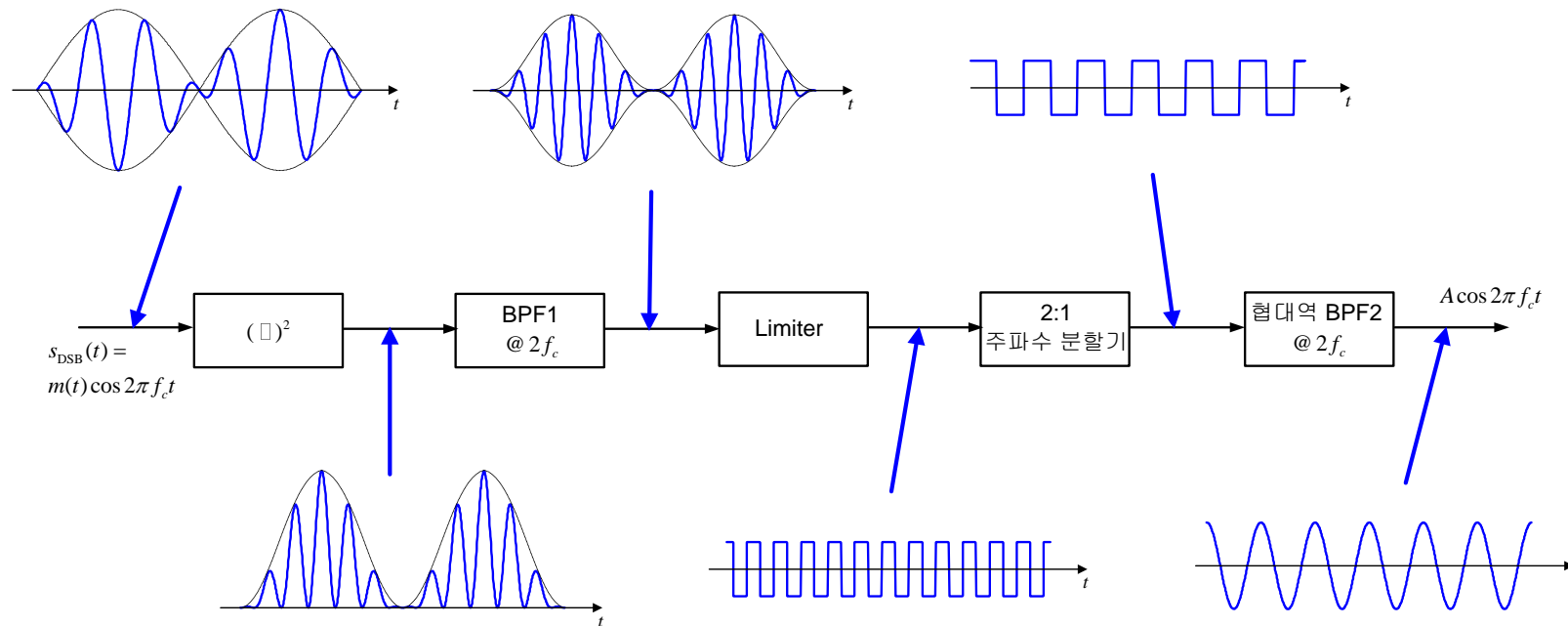
PLL과 AM 신호의 동기 검파(5)

■ PLL을 이용한 AM 신호의 검파



제공법 소자를 이용한 반송파 추출(I)

■ 제공법 소자를 이용한 반송파 추출

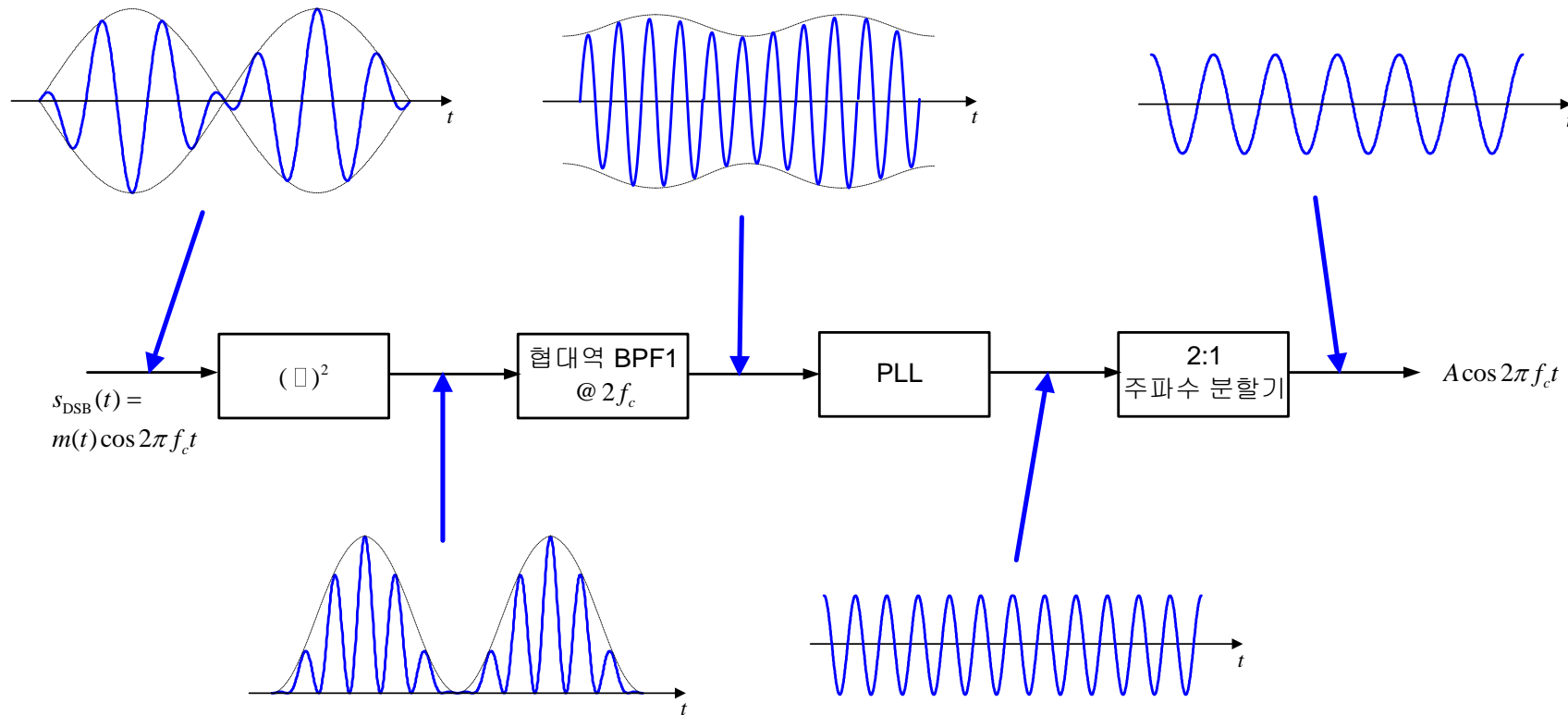


• 제공법소자 출력

$$s_{\text{DSB}}^2(t) = m^2(t) \cos^2 2\pi f_c t = \frac{1}{2}m^2(t) + \frac{1}{2}m^2(t) \cos 4\pi f_c t$$

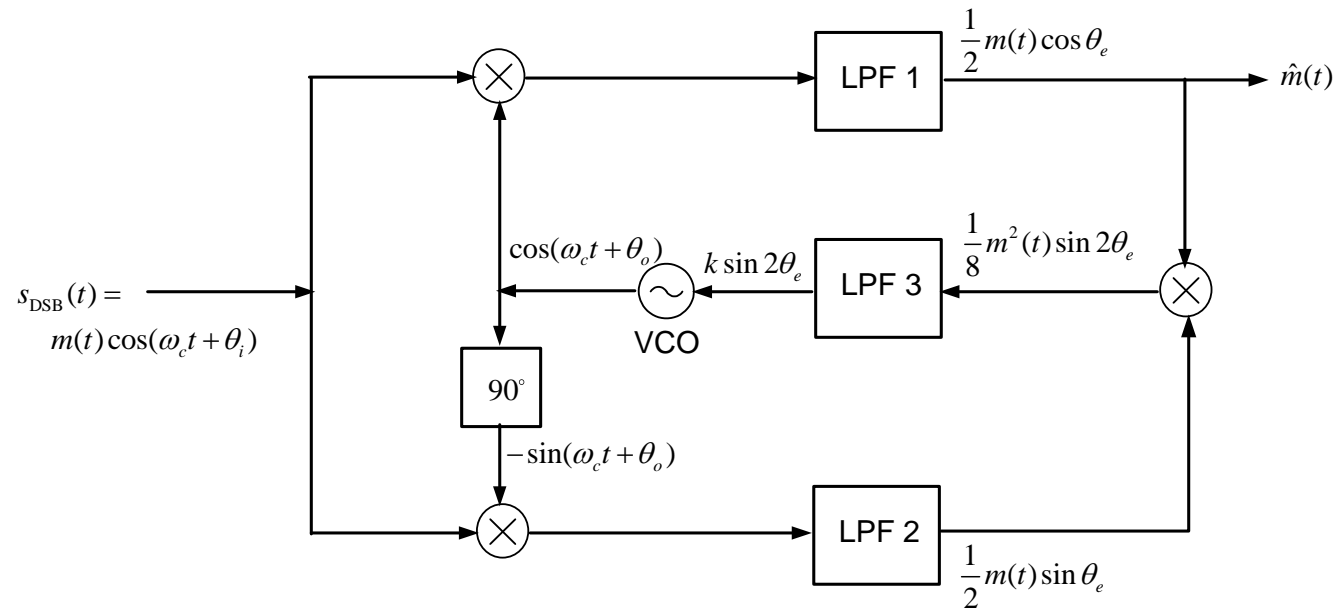
제공법 소자를 이용한 반송파 추출(2)

■ 제공법 소자와 PLL을 이용한 반송파 추출



COSTAS 루프를 이용한 동기 검파기

■ Costas Loop를 이용한 DSB-SC 신호의 검파



- DSB-SC (Double Sideband Suppressed Carrier)
- DSB-TC (Double Sideband Transmitted Carrier)
- SSB (Single Sideband)
- VSB (Vestigial Sideband)
- 반송파 추적
- 주파수 분할 다중화와 수퍼헤테로다인 수신기



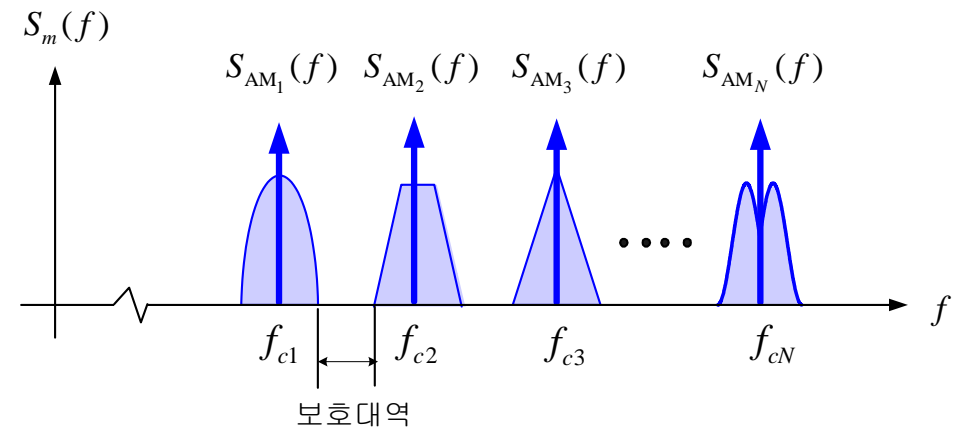
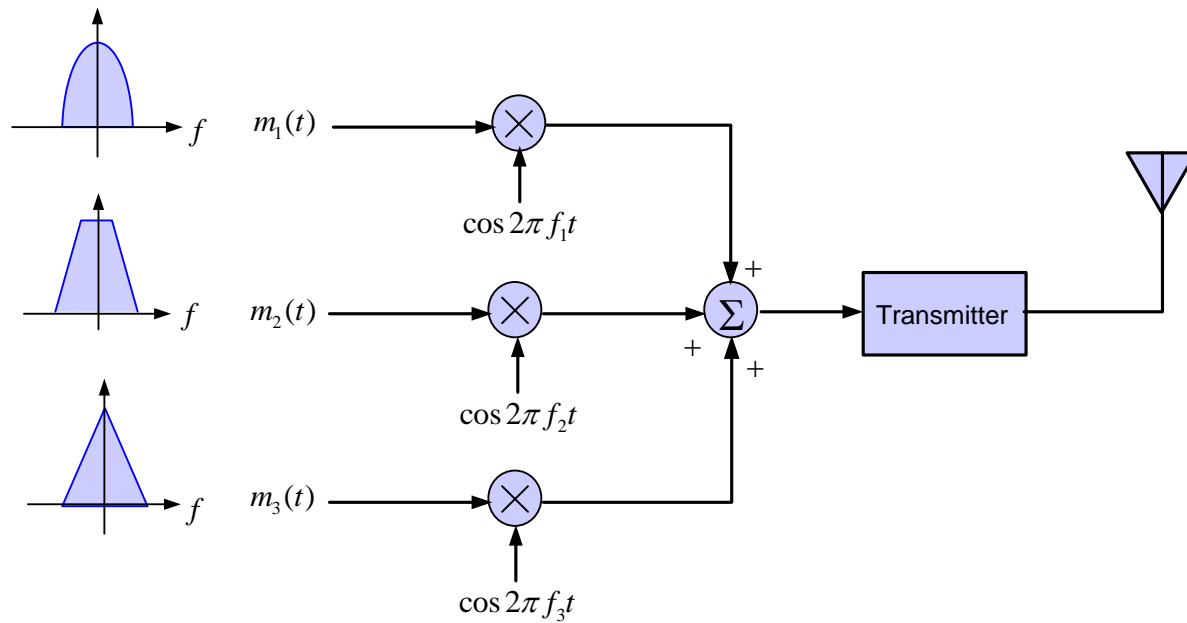
FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (FDM)

■ 주파수분할 다중화

- 기저대역 신호들을 높은 주파수(Radio Frequency: RF)의 반송파를 사용하여 스펙트럼 천이시키는데, AM 방송인 경우 540 KHz에서부터 1600 KHz까지의 RF 대역이 할당되어 있다.
- AM 변조에서는 음성 신호의 최대 주파수 성분을 4 KHz로 하며 전송대역은 그 두 배인 8 KHz가 된다.
- 신호 간 간섭이 적게 일어나게 하고 수신기에서 대역통과 필터에 의한 신호의 분리를 쉽게 하기 위해 각 스펙트럼간에는 2 KHz 정도의 대역을 비워두는데 이를 보호 대역(guard band)이라 한다.
- AM 방송에서는 신호별 반송 주파수 간격이 10 KHz로 정해져 있다.



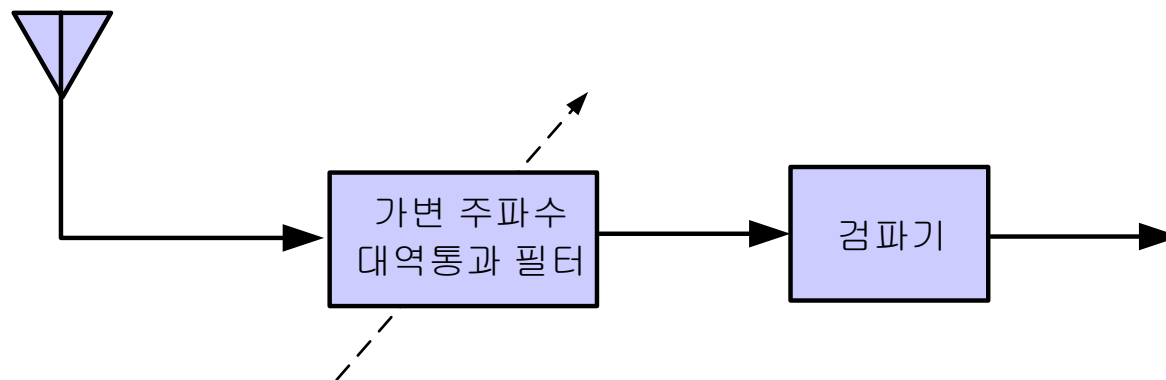
FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (FDM)



FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (FDM)

■ 주파수분할 다중화

- AM 방송의 수신기에서는 방송국의 분리와 복조가 이루어진다.
- 여러 방송국 중에서 원하는 채널을 선택할 수 있도록 하기 위해서는 그림과 같이 수신기 대역통과 필터의 중심 주파수를 쉽게 변화시킬 수 있어야 한다.



AM 방송 수신기

■ AM 방송 신호의 수신

- 수신 RF 신호에는 여러 채널의 스펙트럼이 존재하고 있는데, 수신기의 동작 과정은 방송국의 분리(separation), 신호의 증폭 및 복조로 이루어진다.
- 첫 번째 작업은 RF 대역에서 원하는 채널의 스펙트럼을 취하는 과정인데, BPF를 사용하는 대신 LC 공진 회로의 대역통과 특성을 이용하면 구현이 간단하다.
- 공진 회로에서 C 값을 변화시키면 대역통과 특성의 중심 주파수가 변화한다. 이를 이용하여 채널을 선택하는 작업을 동조(tuning)라 한다.
- 안테나에 유기되는 전압의 크기는 매우 작기 때문에 증폭이 필요한데, 이것이 두 번째 과정이다.
- 동조 증폭기(tuned amplifier)를 사용하면 동조와 증폭을 동시에 실현할 수 있다.



AM 방송 수신기

■ 동조

- 공진 회로에서의 중심 주파수

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- C 값을 가변시킴으로써 원하는 채널의 반송파 주파수에 동조시킬 수 있다.
- 바람직한 동조 과정은 대역폭은 일정하고 중심 주파수만 가변인 BPF를 구현하는 것이다.
- 즉 어떤 방송국이 선택되든지 고정된 협대역(10 KHz) 필터가 필요하다.
- LC 공진회로의 문제점: 중심 주파수에 따라 대역폭이 변화한다.
- LC 공진회로에서 동조 주파수가 n 배로 증가하면 대역폭은 n^2 배 증가한다.



AM 방송 수신기

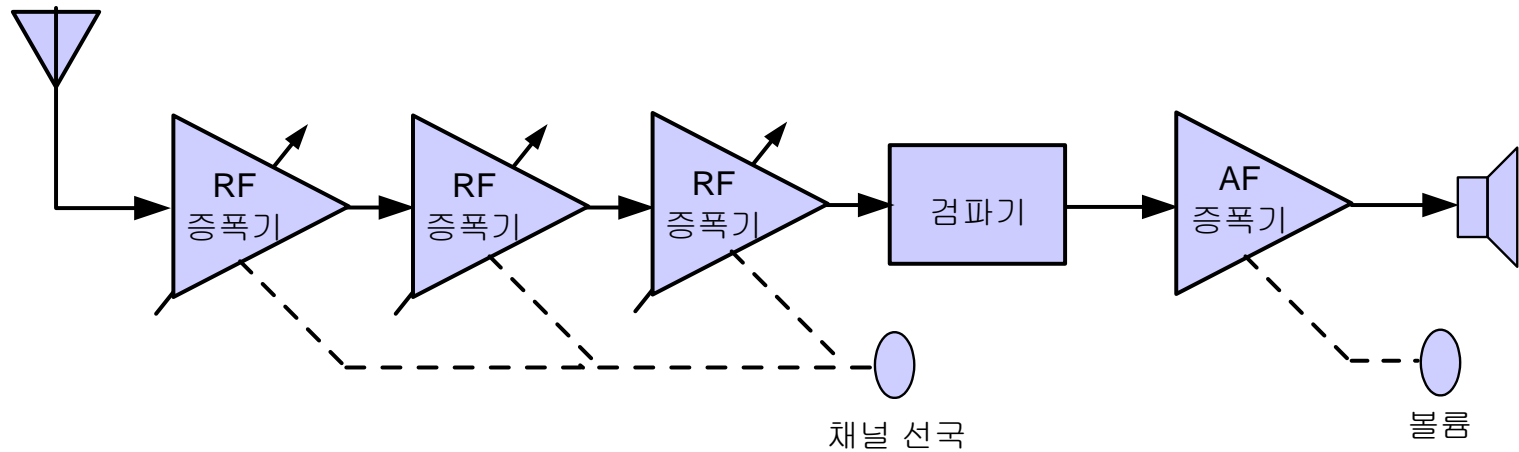
■ 동조

- 예:AM 방송의 경우 최저 주파수는 540 kHz, 최고 주파수는 1600 kHz
- 540 kHz에 동조시켰을 때의 대역폭에 비해 1600 kHz에 동조시켰을 때의 LC 공진회로는 대역폭이 약 9배가 되어 신호를 처리하는데 문제가 있다.



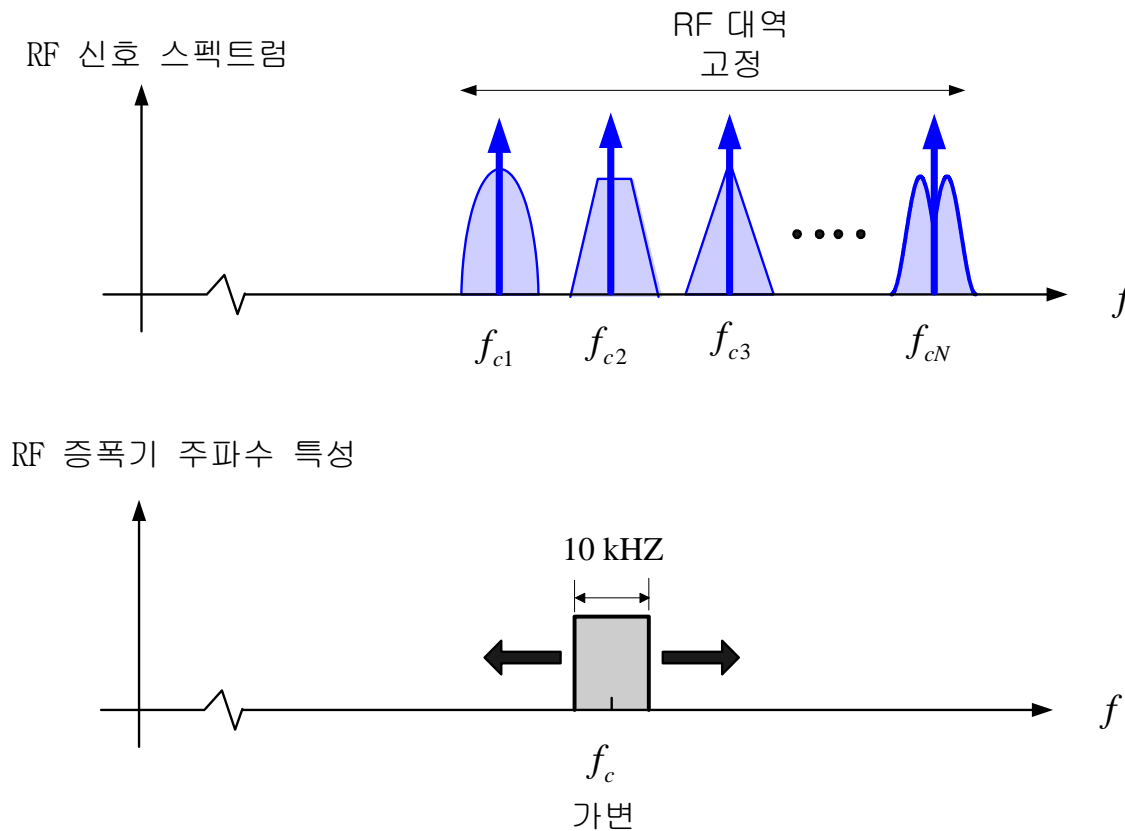
TRF 수신기(I)

- TRF(Tuned Radio Frequency) 수신기: 초기의 AM 수신기
 - RF 대역에서 직접 동조와 증폭이 이루어지는 구조의 수신기
 - 중심 주파수가 가변인 대역통과 필터를 실현하여 원하는 채널의 신호만 선택한다.



TRF 수신기(2)

■ TRF 수신기의 동조 방식



TRF 수신기(3)

■ TRF 수신기의 문제점

- 앞서 언급한 것처럼 이 방식은 채널에 따라 필터의 대역폭을 일정하게 유지시키기 어렵다는 문제점이 있다.
- 높은 주파수의 채널을 10 KHz의 대역폭으로 선택하려면 선택도(즉 Q factor)가 높은 대역통과 필터가 필요하다.
- 높은 선택도의 대역통과 특성을 얻기 위해서는 다단(multi-stage)의 필터 과정을 구현하는데, 보통 3단을 사용한다.
- 그러나 모든 단의 동조 증폭기가 같은 비율로 변화하지 않으므로 동조시키기가 어렵다.



수퍼헤테로다인 수신기(I)

■ 수퍼헤테로다인(superheterodyne) 수신기

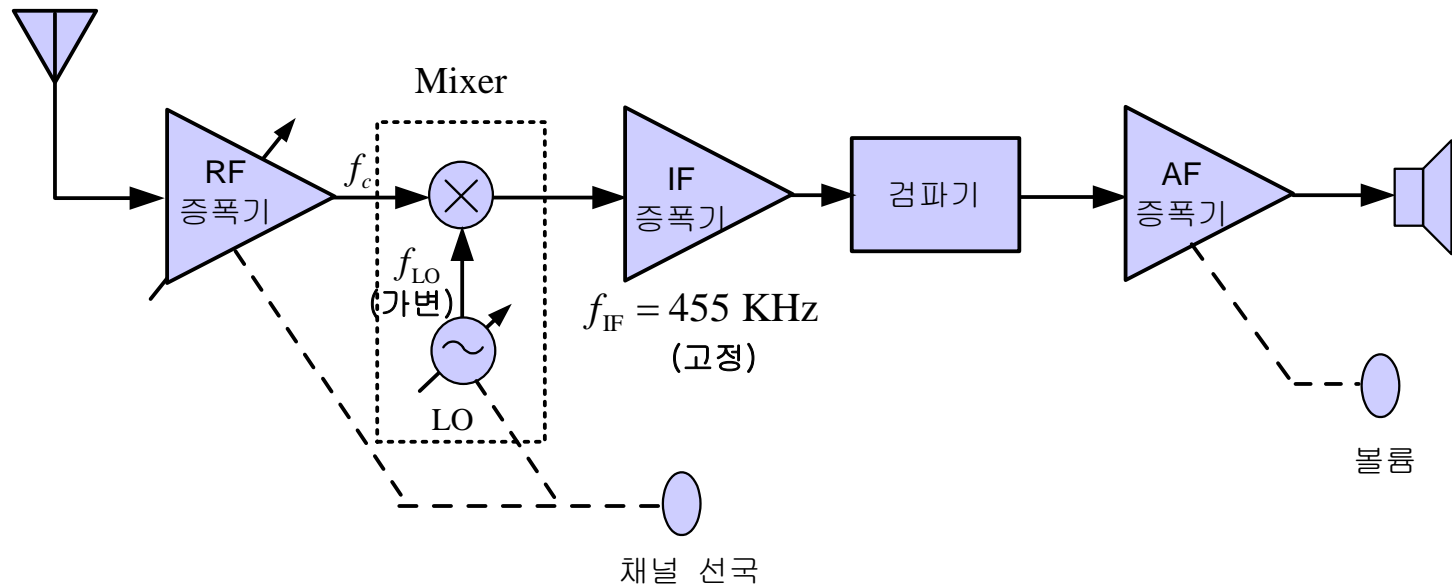
- 동조 증폭기의 중심 주파수를 고정시키고 수신된 전체 RF 스펙트럼을 이동시키면서 원하는 채널의 스펙트럼이 통과대역에 들어오게 하는 방식
- 즉 주파수 축에서 신호선택 윈도우를 움직이는 대신, 윈도우의 위치를 고정시키고 전체 축을 움직이는 방식이다.
- 여기서 고정된 주파수를 중간 주파수(Intermediate Frequency: IF)라 하는데, 상용 AM 방송의 경우 $f_{IF} = 455 \text{ KHz}$ 로 정해져 있다.



수퍼헤테로다인 수신기(2)

■ 수퍼헤테로다인 수신기

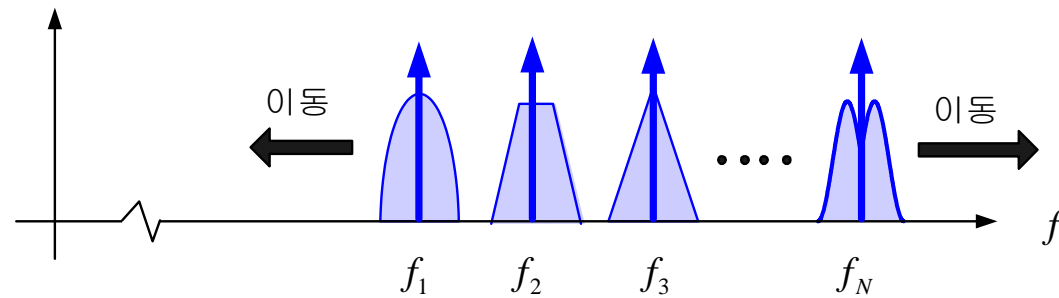
- 수신된 RF 신호는 가변 LO의 출력과 곱해짐으로써 주파수 천이된다.
- LO 주파수를 조정하여 RF 스펙트럼 중 원하는 채널의 스펙트럼이 고정된 특성의 IF 증폭기의 대역폭 내에 들어오도록 한다.



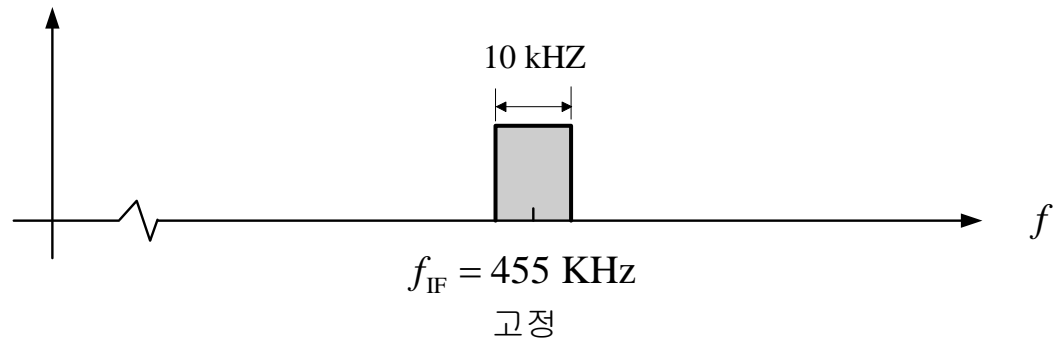
수퍼헤테로다인 수신기(3)

■ 수퍼헤테로다인 수신기의 동조 방식

이동된 신호 스펙트럼



IF 증폭기 주파수 특성



수퍼헤테로다인 수신기(4)

- RF 스펙트럼을 IF 대역으로 주파수 천이시키는 두 가지 방법
 - 주파수 변환기(또는 mixer)를 통하여 RF 스펙트럼을 IF 대역으로 이동시킨다.
 - RF 스펙트럼에서 원하는 채널의 반송파 주파수를 f_c 라 하자.
 - 이 주파수를 중간 주파수 f_{IF} 로 변환시키기 위하여 혼합기의 국부 발진기 주파수 f_{LO} 는 다음을 만족해야 한다.

$$|f_{LO} - f_c| = f_{IF}$$

- 따라서

$$f_{LO} = f_c + f_{IF}$$

또는

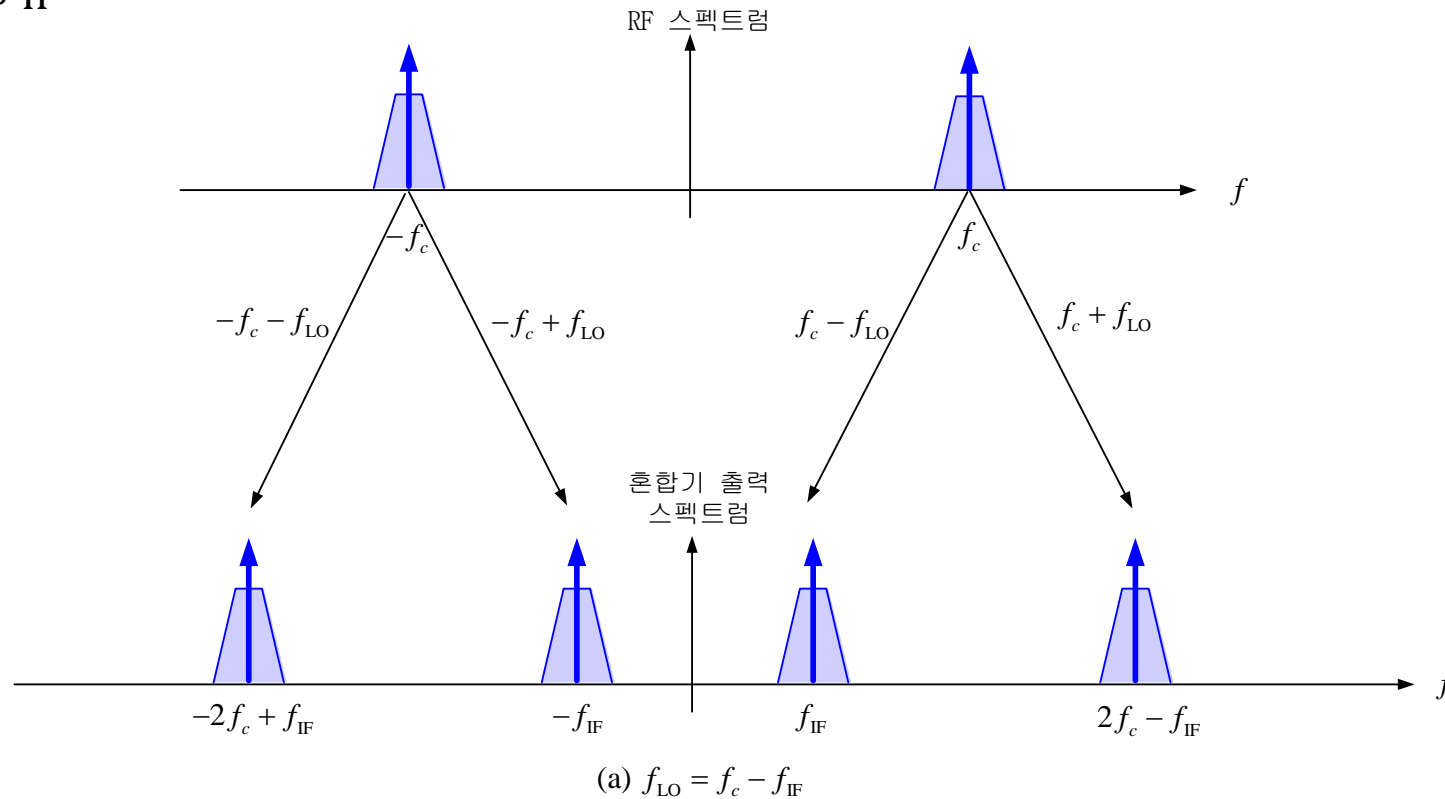
$$f_{LO} = f_c - f_{IF}$$



수퍼헤테로다인 수신기(5)

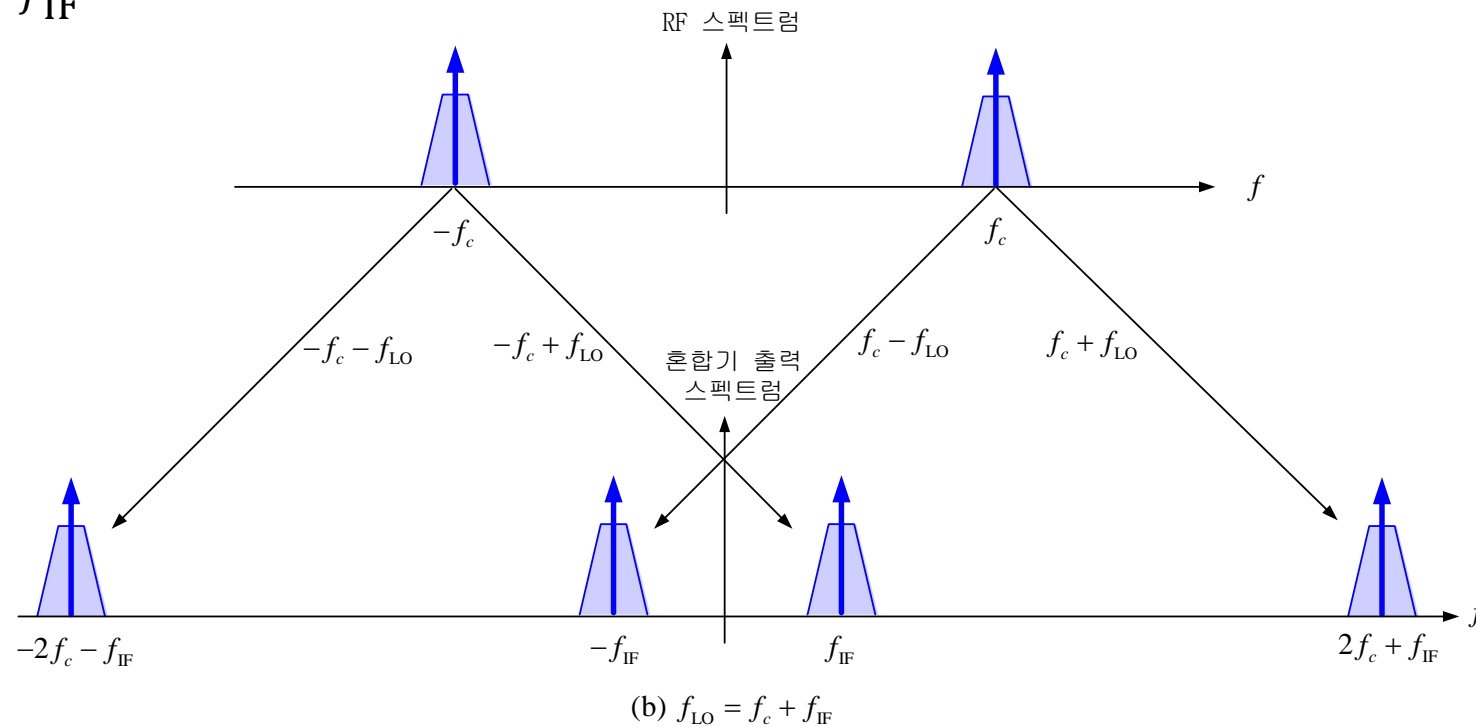
■ RF 스펙트럼을 IF 대역으로 주파수 천이시키는 두 가지 방법

- (a) $f_{LO} = f_c - f_{IF}$



수퍼헤테로다인 수신기(6)

- RF 스펙트럼을 IF 대역으로 주파수 천이시키는 두 가지 방법
 - (b) $f_{LO} = f_c + f_{IF}$



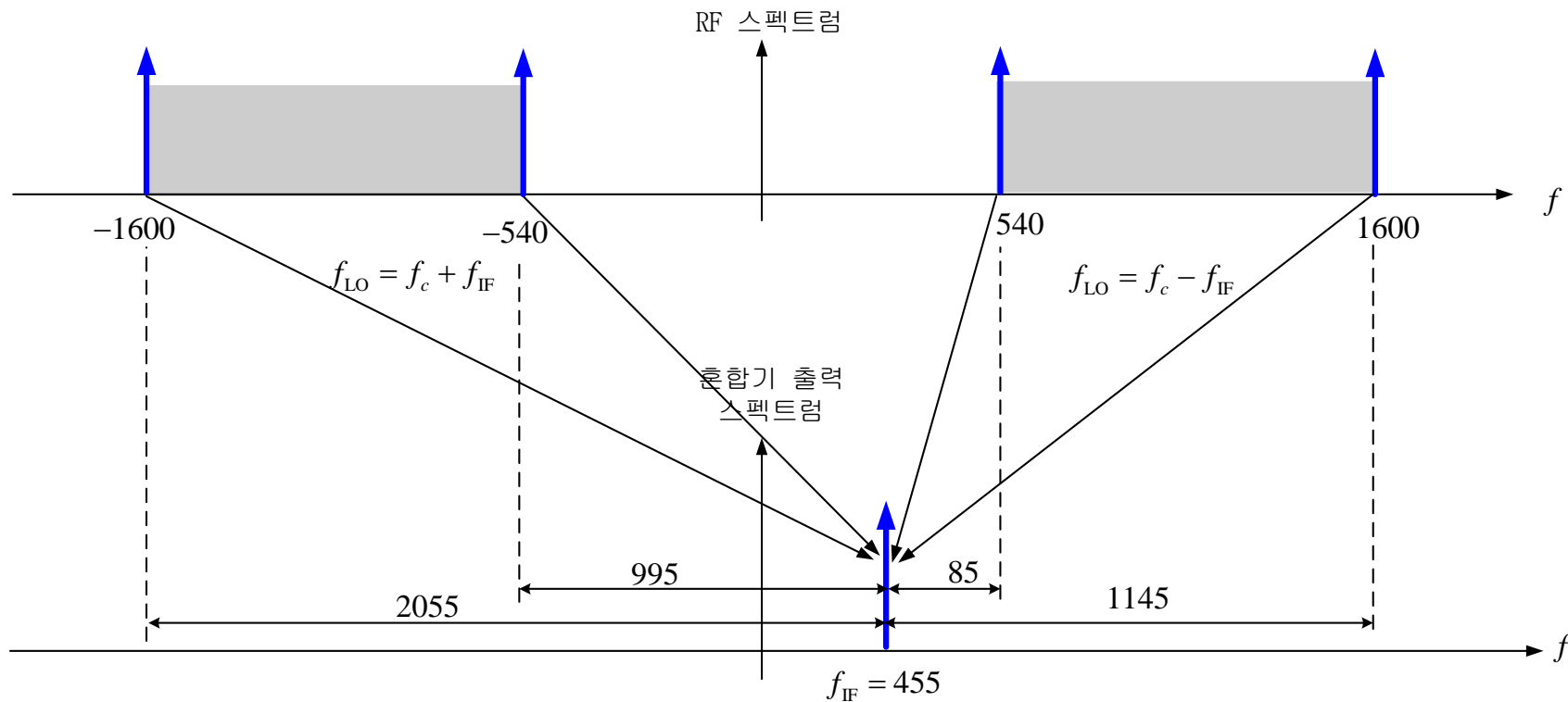
수퍼헤테로다인 수신기(7)

- RF 스펙트럼을 IF 대역으로 주파수 천이시키는 두 가지 방법
 - $f_{LO} = f_c + f_{IF}$ 의 조건을 사용하는 것이 유리하다.
 - AM에서는 RF 스펙트럼이 $540 \leq f_c \leq 1600$ kHz 의 범위에 있으므로 $f_{LO} = f_c + f_{IF}$ 를 사용하는 경우 LO 주파수가 $995 \leq f_{LO} \leq 2055$ kHz 범위에서 가변되어야 한다.
 - 반면에 $f_{LO} = f_c - f_{IF}$ 를 사용하면 LO 주파수가 $85 \leq f_{LO} \leq 1145$ kHz 범위에서 가변되어야 한다.
 - 전자의 경우 최대 주파수 대 최저 주파수는 2.07인데 비해 후자의 경우는 그 비율이 13.5나 되는 큰 값을 가진다.
 - LO 주파수의 상대적인 가변 범위가 넓으면 구현하기 어렵다.
 - 결론적으로 수퍼헤테로다인 수신기에서는 원하는 RF 신호의 반송파 주파수보다 455 kHz 높은 주파수를 혼합기의 LO 주파수로 사용한다.



수퍼헤테로다인 수신기(8)

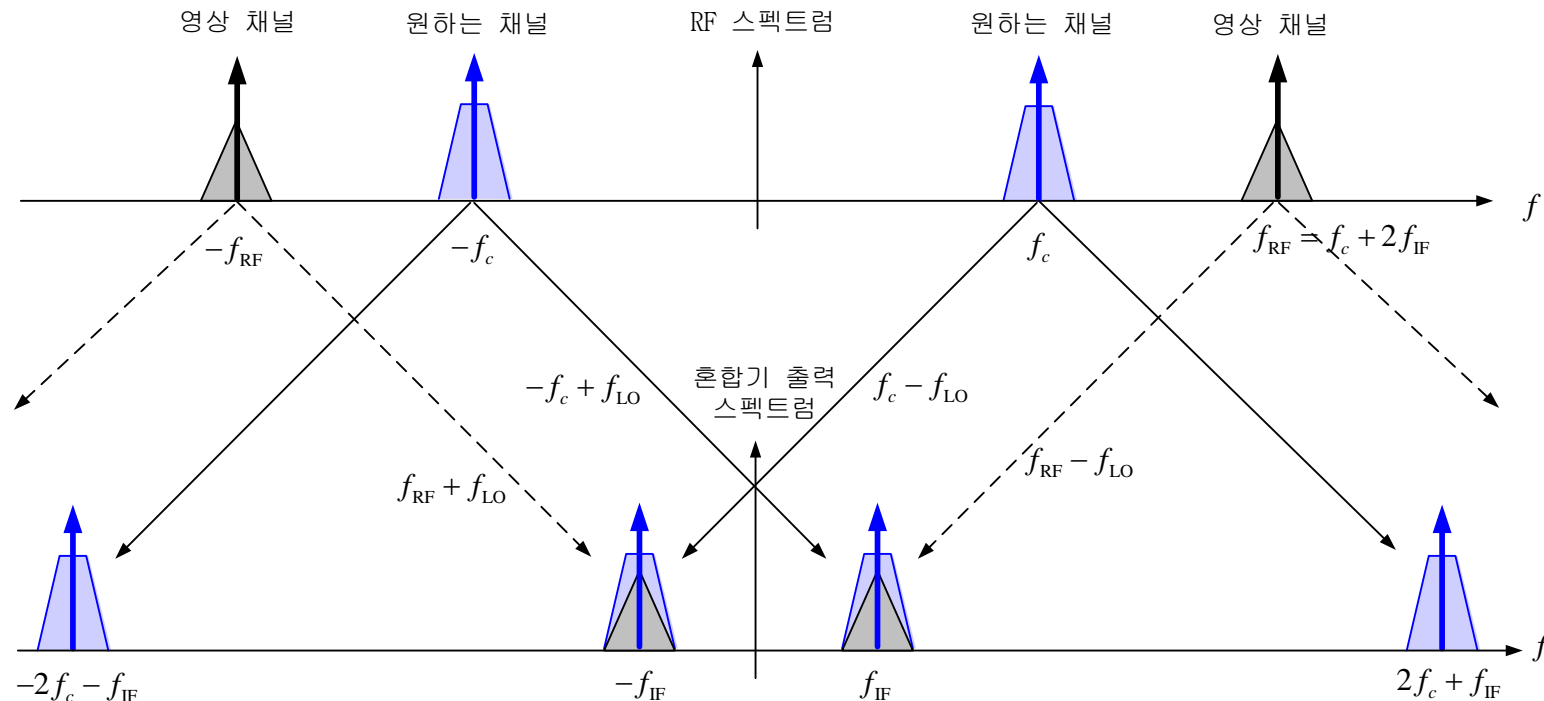
■ 주파수 천이 방법의 비교



수퍼헤테로다인 수신기(9)

■ 수퍼헤테로다인 수신기의 단점

- 주파수 변환 과정에서 수신 신호와 LO 신호를 곱하면 두 주파수의 합과 차만큼 스펙트럼이 이동하는데, 원하는 채널뿐만 아니라 원하지 않는 채널의 스펙트럼까지 IF 대역에 들어오게 된다.



수퍼헤테로다인 수신기(10)

■ 수퍼헤테로다인 수신기의 단점

- 원하는 채널의 주파수가 f_c 인 경우 혼합기 국부발진기의 주파수는 $f_{LO} = f_c + f_{IF}$ 를 사용한다.
- 그런데 주파수 혼합 과정에서 주파수의 합과 차가 만들어지므로 원하지 않는 채널도 IF 대역으로 들어올 수 있다.
- 즉 주파수가 $f_{RF} = f_c + 2f_{IF}$ 인 원하지 않는 채널도

$$f_{RF} - f_{LO} = (f_c + 2f_{IF}) - (f_c + f_{IF}) = f_{IF}$$

가 되어 IF 대역으로 들어와서 간섭을 유발한다.

- 이 주파수 f_{RF} 를 f_c 에 대한 영상 주파수(image frequency)라 한다.
- 원하는 채널의 반송파 주파수보다 IF 주파수의 두 배만큼 높은 반송파 주파수의 채널도 함께 선택되어 간섭 신호로 작용한다.



수퍼헤테로다인 수신기(II)

■ 수퍼헤테로다인 수신기의 단점

- 영상 채널이 일단 IF 대역에 들어오면 원하는 채널과 분리하는 것은 불가능하다.
- 따라서 주파수 변환하기 전 단계인 RF 대역에서 RF 동조 회로에 의해 영상 채널이 제거되어야 한다.
- TRF 수신기처럼 인접한 채널을 제거하는 것이 아니라 상당히 떨어진 주파수의 영상 채널을 제거하면 되므로 RF 동조회로의 부담은 크지 않다.





ANY QUESTIONS?