

## MODÜLASYON

Modülasyon iletilecek işaretin iletim ortamına uygun hale getirilmesidir. Genel anlamda kodlama olarak bilinen modülasyon iki işaretin kombinasyonundan (çarpma işleminden) oluşan bir prosestir. İletilmek istenen mesaj veya bilgi işareti düşük frekanslı olduğundan direkt olarak gönderilmesi durumunda çok geniş boyutlu anten gerektireceğinden iletimi mümkün olmaz. Bunun yerine elektromanyetik dalga özelliğindeki taşıyıcı olarak yararlanılacak çok daha yüksek frekanslı bir işaretin üzerine bindirilerek hem daha hızlı iletimi sağlanırken, bununla aynı zamanda düşük frekanslı işaret daha yüksek frekansa ötelenerek (translation) daha düşük boyuttaki makul antenlerle iletimi mümkün olur.

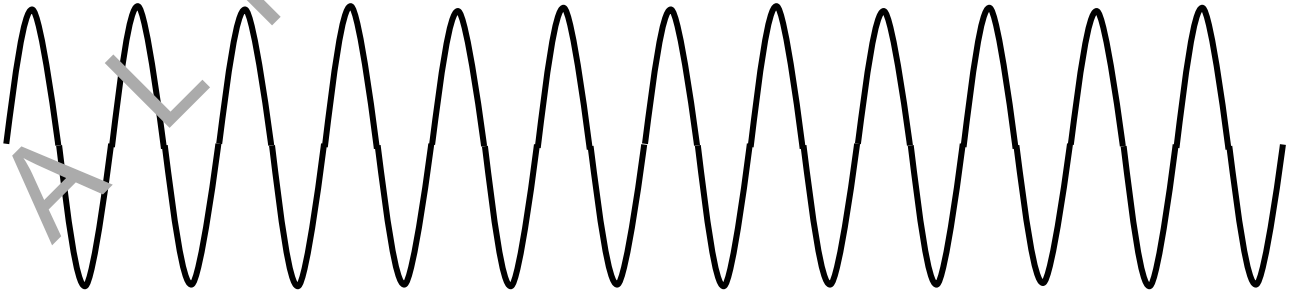
Bir işaretin genel parametreleri genlik ( $A$ ), frekans ( $\omega$ ) ve faz ( $\theta$ ) olduğundan bunlardan herhangi biri göz önüne alınarak kodlama yani modülasyon gerçekleştirilir.

$$x(t) = A \sin(\omega t + \theta)$$

Taşıyıcı durumundaki işaretin genlik, frekansı veya fazı gibi parametrelerinden herhangi biri öyle değiştirilir ki, bu değişim sonucu taşıyıcı işaretin ilgili parametresi değişirken aynı zamanda üzerine gönderilmek istenen düşük frekanslı mesaj işaretinin bindirilmesi sağlanır. İlgili parametresi bu yolla değiştirilen taşıyıcı işaretinin kodlandığı, diğer bir deyişle modüle edildiği kabul edilir.

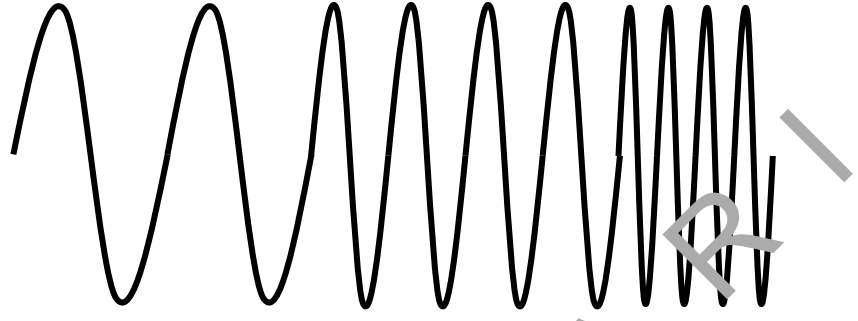


Şekil 1 Mesaj işareti :  $x_M(t) = \sin \omega_M t$

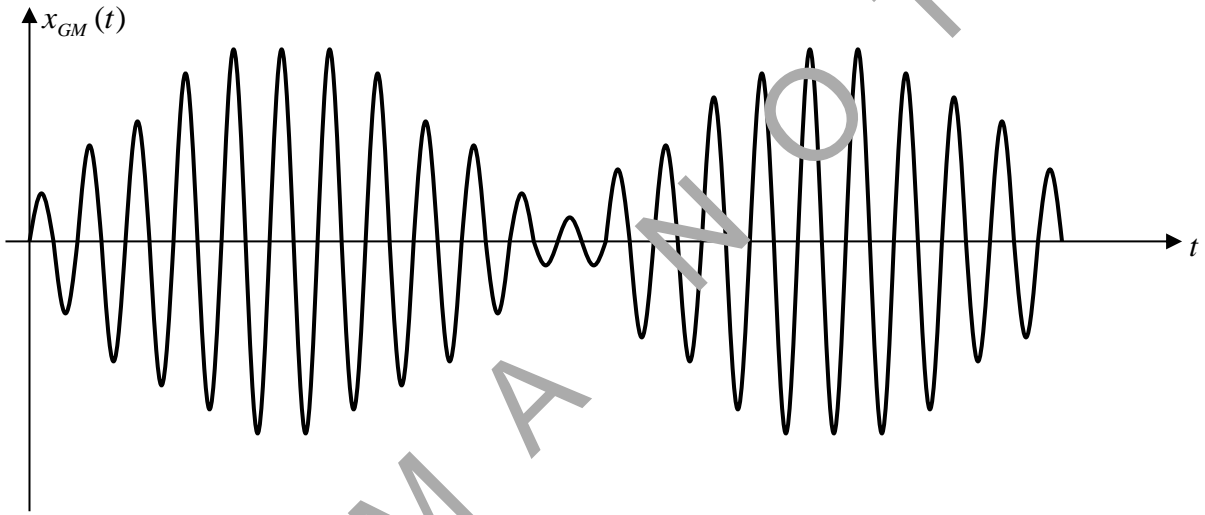


Şekil 2 Taşıyıcı işaret :  $x_C(t) = \sin \omega_C t$

$$\omega = 2\pi f \rightarrow \omega_C \gg \omega_M$$



Şekil 3 Lineer Frekans Modülasyonlu Chirp İşareti  $x(t) = \sin\left(\omega t + \frac{k}{2}t^2\right)$



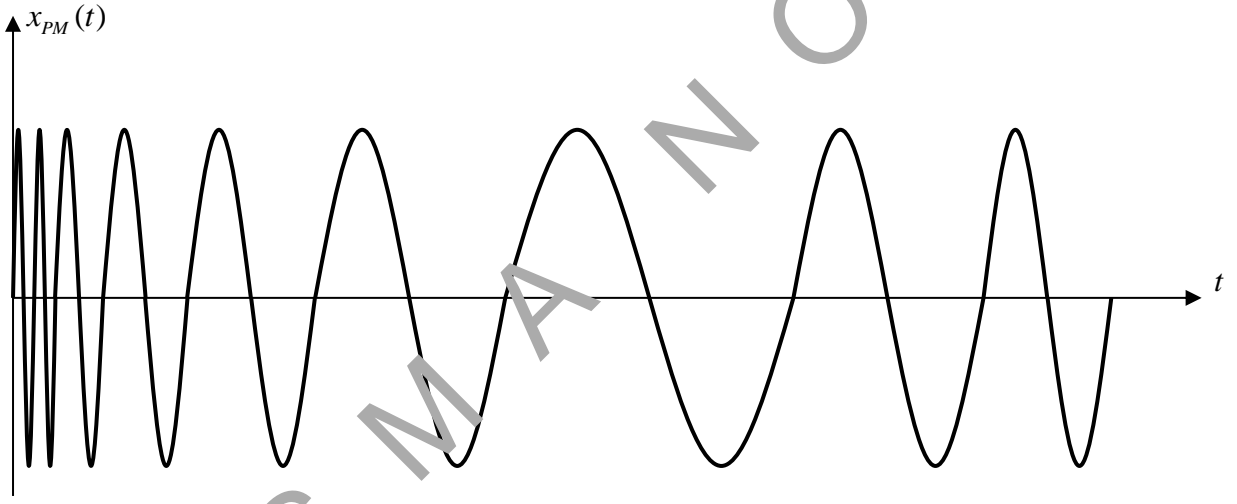
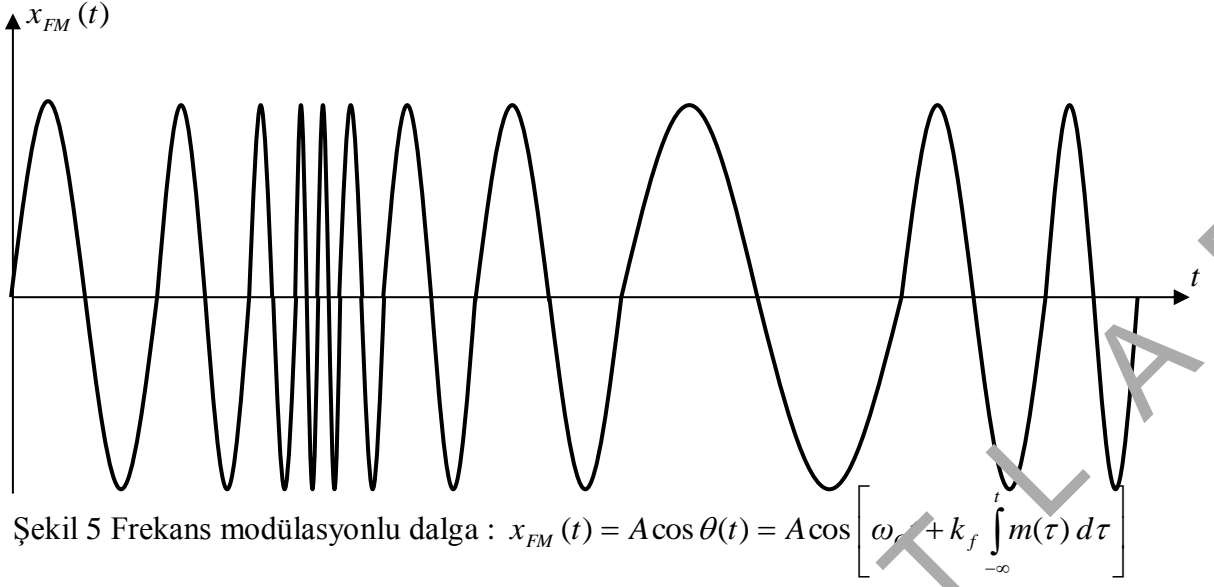
Şekil 4 Genlik modülasyonlu dalga :

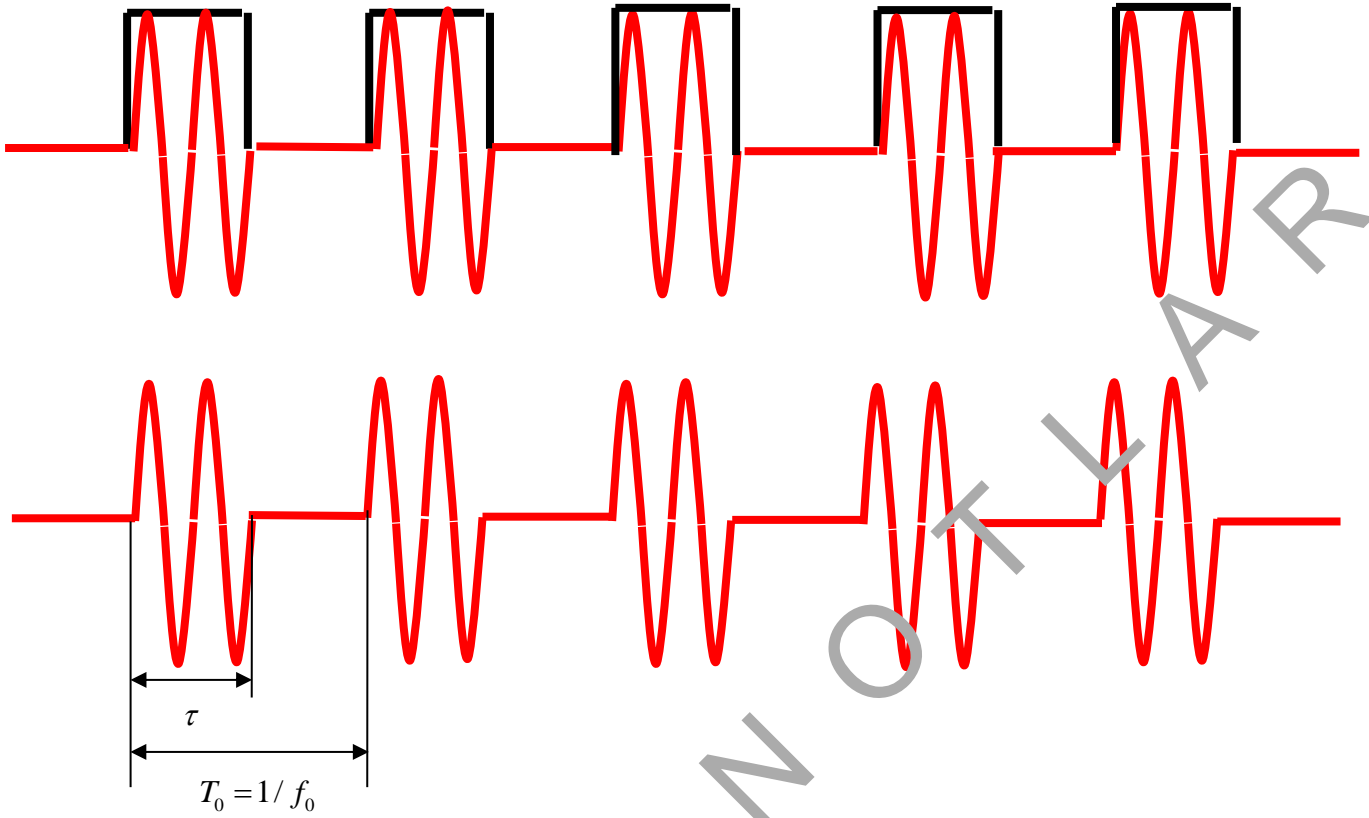
$$x_{GM}(t) = A_C \cos \omega_C t + \frac{\mu}{2} [\cos(\omega_C + \omega_m)t + \cos(\omega_C - \omega_m)t]$$

$$m(t) = A_m \cos \omega_m t \quad \text{ve} \quad x_C(t) = A_C \cos \omega_C t$$

$$\mu = A_C A_m$$

$$x_{GM}(t) = m(t) \times x_C(t) = A_C [1 + m(t)] \cos \omega_C t$$





Şekil 7 Darbe modülasyonlu dalga :  $f(t) = \frac{A\tau}{T_0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A}{n\pi} \sin(n\pi f_0 \tau) \cos 2\pi n f_0 t$

$$x_{GM}(t) = A_C \cos \omega_C t + \frac{\mu}{2} [\cos(\omega_C + \omega_m)t + \cos(\omega_C - \omega_m)t]$$

Genlik modülasyonlu işaret

$$x_{FM}(t) = A \cos \theta(t) = A \cos \left[ \omega_C t + k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau \right]$$

Frekans modülasyonlu dalga

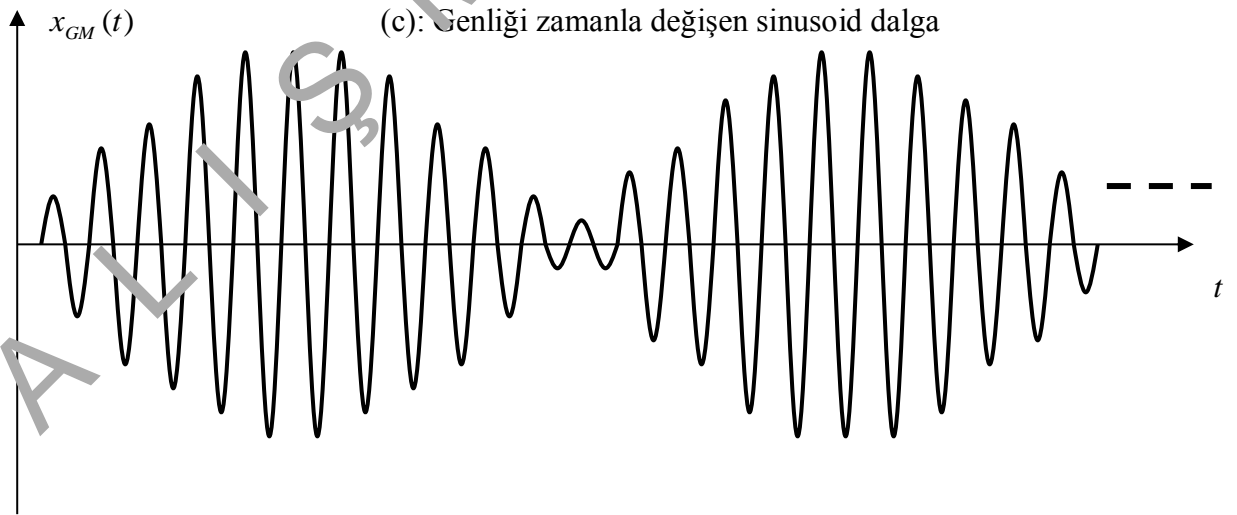
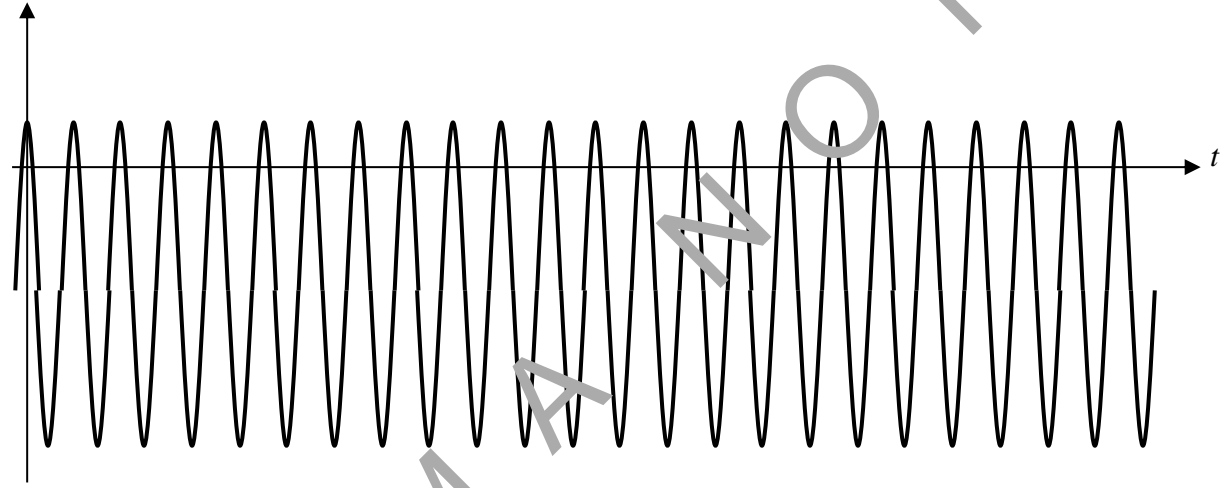
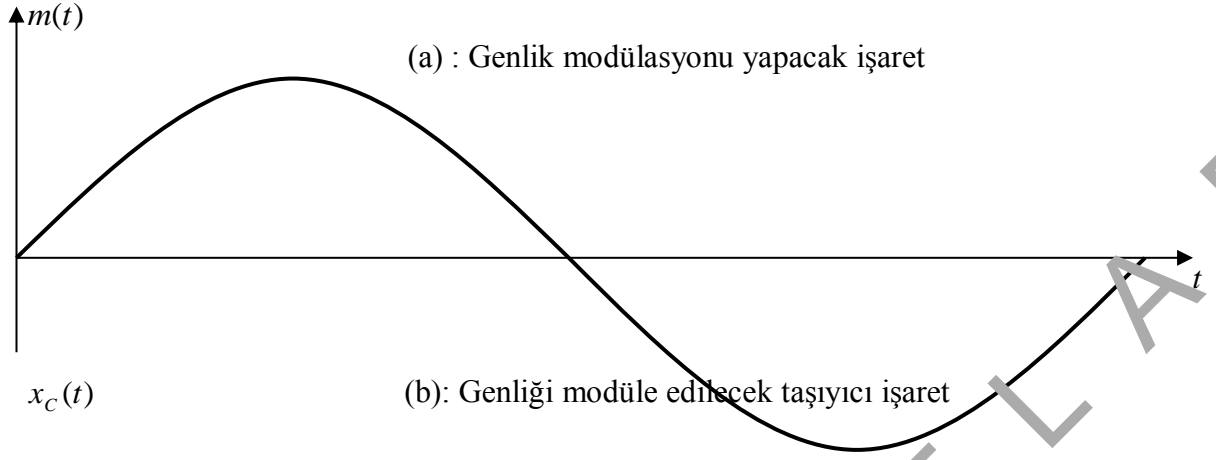
$$x_{PM}(t) = A \cos \theta(t) = A \cos(\omega_C t + k_p m(t))$$

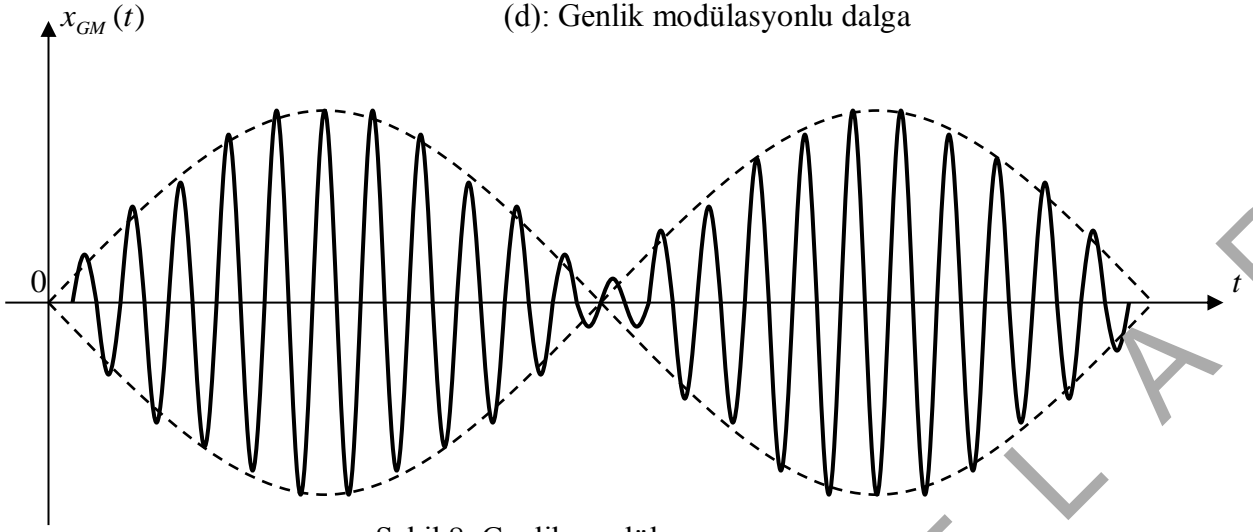
Faz modülasyonlu dalga

$$f(t) = \frac{A\tau}{T_0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A}{n\pi} \sin(n\pi f_0 \tau) \cos 2\pi n f_0 t$$

Darbe modülasyonlu dalga

## 1. Genlik Modülasyonunun Grafik Gösterimi



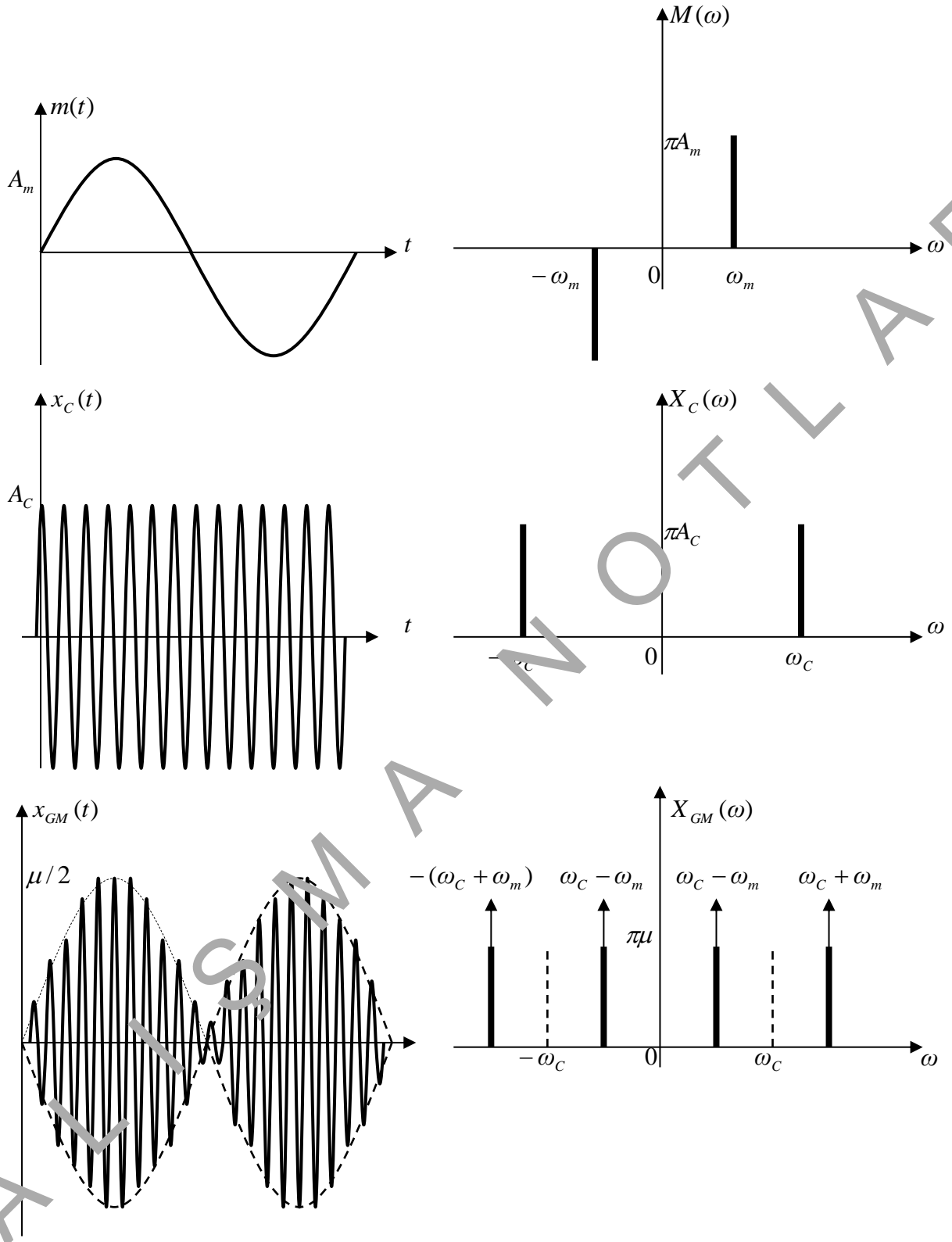


Şekil 8 Genlik modülasyonu

Sonuçta Şekil (a) daki zayıf frekanslı mesaj/bilgi işaretini kendi hızıyla ulaşamayacağı noktalara şekil (b) deki daha yüksek frekanslı taşıyıcı işaret ile erişme imkanına sahip olmuştur. Bunun için (b) deki yüksek frekanslı işaret modüle edilmiştir, yani kodlanmıştır (modülasyon). Normalde (b) deki işaret klasik periyodik bir sinüsoidal fonksiyondur. Yani genliği frekansla sabit olup, değişme özelliği göstermez. Ancak bu işaret (c) deki hale getirilmiştir, diğer bir deyişle kodlanmış veya modüle edilmiştir. Artık (c) deki işaretin (b) ye benzer tarafı, frekans ve faz olarak aynı olmasına karşın genliği değişmiştir. Daha doğrusu genliği zamanla değişir hale gelmiştir. Bu şekle bakıldığında ilgili period içerisindeki her andaki genlik değerinin farklı olduğunu, dolayısıyla zamanla değişir olduğunu gözlemlemekteyiz. Bu değişimin sebebi (a) daki zayıf frekanslı bilgi işaretini üzerine alması gereğidir. Dikkat edilirse, (c) deki modüle edilmiş taşıyıcı işaretin tepe noktalarından itibaren takip edilmesi durumunda (a) daki düşük frekanslı mesaj işaretini üzerine aldığı fark edilecektir. Mesaj işaretinin taşıyıcı işaret üzerine bindirilmesi prosesine modülasyon denilmektedir. Modülasyon taşıyıcı işaretin genliğinin değiştirilmesi yoluyla yapıldığından söz konusu modülasyon da genlik modülasyonu olarak anılır. Buna göre klasik bir sinüsoidal işaretin genlik, frekans veya faz gibi parametrelerinden herhangi birinin benzer yolla zamanla değişir hale getirilmesi genel anlamda modülasyon denilmektedir. Bu örneğimizde genlik parametresi dikkate alındığından yapılan işleme genlik modülasyonu denildi. Eğer değişim sinüsoidal işaretin frekansının zamanla değişir hale getirilmesi üzerine olsaydı, frekans modülasyonu, faz parametresinin zamanla değişir hale getirilmesi durumunda da faz modülasyonu söz konusu olacaktı.

Modülasyon işlemine genel anlamda kodlama denilmektedir. Kodlama denilmesinin sebebi, ortada taşıyıcı işaret gibi kodlanan bir işaret olmasıdır. Yüksek frekanslı işaret öyle kodlanmıştır ki, bu kodlamayla iki özellik elde edilmiştir. Hem iletilmesi istenen zayıf frekanslı işaret hem de onu taşıyacak yüksek frekanslı işaret birlikte elde edilmiştir. Ancak kodlama yüksek frekanslı işaret üzerinde yapılmıştır. Bunun sebebi de kodlamanın daima güçlü yani kuvvetli işaret üzerinde yapılması gereğidir. Zayıf frekanslı işaretin benzer yolla yüksek frekanslı işareti benzer yolla üzerine alması mümkün değildir. Yüksek frekanslı işaretin değişimi organize edilerek üzerinde düşük frekanslı işaretin oluşturulması sağlanabilir ki, bu yaklaşım genlik modülasyonu olarak sunulmaktadır.

Buna ek olarak eğer iletim kablosuz haberleşmede kullanılacaksa da gönderme ve almada yararlanılacak ilgili anten boyutlarının göz önüne alındığında, iletilecek verinin anten dalga boyuna hazır hale getirilmesi için de modülasyona ihtiyaç duyulur. Çünkü düşük frekanslı mesaj işaretinin direkt gönderimi için imkansız boyutlarda gereken anten boyu (anten dalga boyu), modülasyonla çok daha küçük boyutlarda makul hale getirilmektedir. Çünkü modülasyonla bir anlamda düşük frekanslı işaretin frekansı, daha yüksek frekanslara taşınmıştır, yani ötelenmiştir (frequency translation).



Şekil 10 Genlik modülasyonu zaman ve frekans domeni



**Tespit – 1 :** Genlik modülasyonunda iletilecek işaretin band genişliği  $\omega_m$  olmasına rağmen bu işaretin iletileceği kanalın band genişliği  $X_{GM}(\omega)$  spektrumundan  $2\omega_m$  olmalıdır. Aksi halde iletim yapılamayacaktır. İletilecek verinin band genişliğinin iki katı ihtiyaç duyulması, diğer bir deyişle gereğinden fazla band genişliği gerektirmesi genlik modülasyonunun handikapıdır.

**Tespit – 2 :** Diğer yandan genlik modülasyonu, genlik değişimi üzerinden yapılması da bir diğer handikaptır. Çünkü bir işaretin gürültüden en kolay etkilenen parametresi genliktir. Bu yüzden genliği değiştirilmiş taşıyıcı işaretten tekrar mesaj işaretinin elde edilmesi sırasında sorunlar yaşanabilir. Çünkü işaret alıcı tarafa ulaştığında muhtemelen gürültüden etkilenerek doğal olarak genlik bozulması söz konusu olacağından, bozulmuş genlik bilgisinden orijinal mesaj işaretinin elde edilmesi de zorlaşmış olacaktır.

### Örnek

Modüle edici işaret  $m(t) = 9\cos 10000\pi t$  ve taşıyıcı frekansı  $x_c(t) = 10\cos 200\pi Kt$  olan bir GM modülatörde

- Alt ve üst yan bantların frekans sınırlarını bulun.
- Eğer  $9\cos 6000\pi t$  modüle edici işaretle genlik modülasyonu yapılıyorsa, alt ve üst yan bantları bulun
- Bant genişliğini bulun.
- Modülasyon indeksini bulun.
- Çıkış frekans tayfını (spektrumunu) çizin.

### Çözüm

$$x_{GM}(t) = A_C \cos \omega_C t + \frac{\mu}{2} [\cos(\omega_C + \omega_m)t + \cos(\omega_C - \omega_m)t]$$

Bağıntısı gereği modüle edici işaret

$$m(t) = 9\cos 10000\pi t = 9\cos 2\pi(5000)t$$

$$x_c(t) = 10\cos 200\pi Kt = 10\cos 200000\pi t = 10\cos 2\pi(100 K)t$$

$$\text{Alt yan bant} = f_C - f_m = 100 - 5 = 95 \text{ kHz}$$

$$\text{Üst yan bant} = f_C + f_m = 100 + 5 = 105 \text{ kHz}$$

Buna göre üst yan bandı (USB) 105 kHz ve alt yan bandı (LSB) 95 kHz olan bir sistem söz konusudur. Diğer bir deyişle bu sistemde ancak 95 – 105 kHz bantları arasında GM (haberleşmesi) yapılabilir.

- b)  $m(t) = 9\cos 6000\pi t$  işaretle GM yapılıyorsa, alt ve üst yan bantlar için

$$m(t) = 9\cos 6000\pi t = 9\cos 2\pi(3000)t$$

$$\text{Alt yan bant} = f_C - f_m = 100 - 3 = 97 \text{ kHz}$$

$$\text{Üst yan bant} = f_C + f_m = 100 + 3 = 103 \text{ kHz}$$

Bu duruma göre alt yan frekansı (LSF) 97 kHz ve üst yan frekansı (USF) 103 kHz olan bir işaret için GM yapılmak istenmektedir. Bu duruma göre bulunan bu değerler 97 – 103 kHz (bant genişliği 6 kHz), 95 – 105 kHz ana sistem bant genişliği arasında olduğundan, 97 – 103 kHz GM sağlıklı yapılabilecektir.

c) Bant genişliği olarak kastedilen 95-105 kHz GM sisteminin bant genişliğidir.

$$B = 2f_m = 2 \times 5 = 10 \text{ kHz}$$

Buna göre böyle bir sistemden 97 – 103 kHz işaret (bant genişliği 6 kHz) iletilebilir.

d) Modülasyon indeksi

$$m(t) = 9 \cos 2\pi(3000)t$$

$$x_c(t) = 10 \cos 2\pi(100 \text{ K})t$$

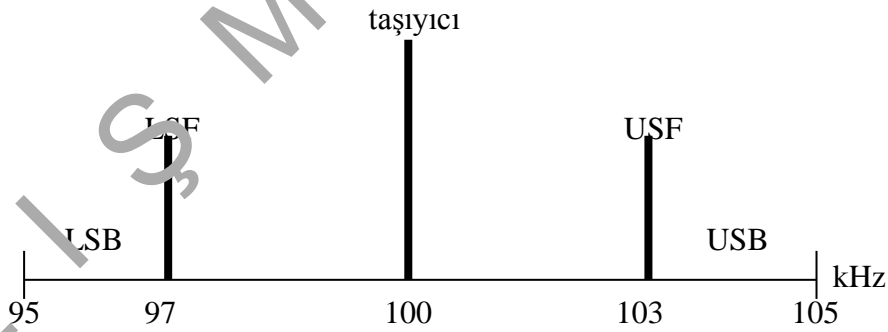
$$m = \frac{A_m}{A_c} = \frac{9}{10} = 0.9$$

$$0 \leq m \leq 1$$

olduğundan, oldukça sağlıklı bir modülasyon söz konusu dur.

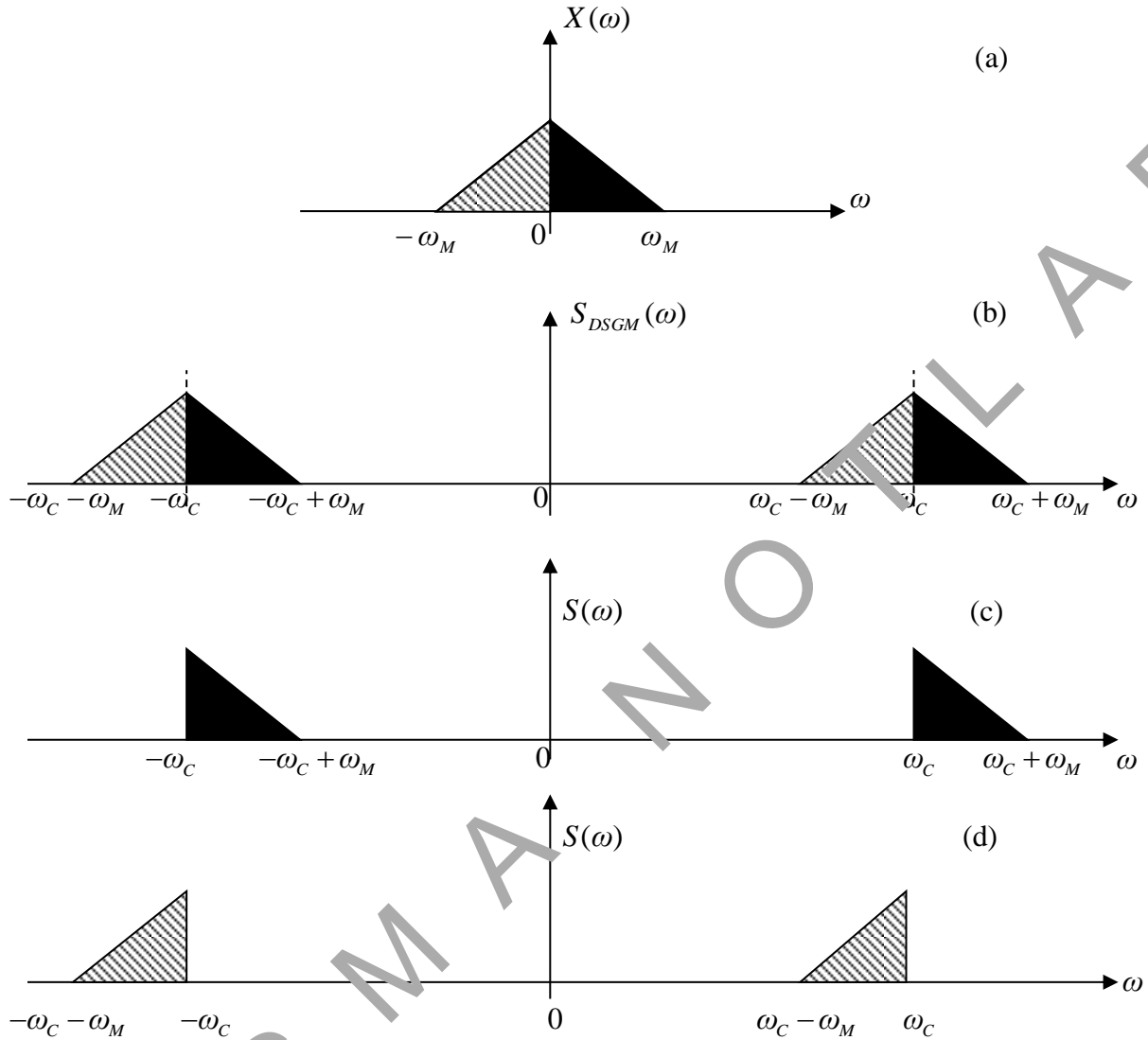
e) Elde edilenlerin ışığında  $m(t) = 9 \cos 2\pi(3000)t$  ile modüle edilen

$x_c(t) = 10 \cos 2\pi(100 \text{ K})t$  işaretinin genliğinin zamanla değişimini gösteren, genlik modülasyonlu  $x_{GM}(t) = m(t) \times x_c(t)$  dalganın, spektrumu ( $X_{GM}(\omega)$ ) yani frekans tayfı aşağıdaki gibi olacaktır.



Şekil 11 10 kHz Band genişlikli GM spektrumu (tayfı)

### Tek Yan Band Modülasyonu



Şekil 12 Çift yan modülasyondan tek yan band modülasyona geçiş

Modülasyon band genişliği :

1.  $BS = \omega_C + \omega_M - (\omega_C - \omega_M) = \omega_C + \omega_M - \omega_C + \omega_M = 2\omega_M$
2.  $BG = \omega_C + \omega_M - (-\omega_C - \omega_M) = -\omega_C + \omega_M + \omega_C + \omega_M = 2\omega_M$

Şekil (a) da gönderilecek orijinal işaretin spektrumu (frekans içeriği) görülmektedir. Bu işaret klasik genlik modülasyonuna tabii tutulduğunda oluşacak spektrum (b) deki gibi elde edilir. Şekil (b) ye göre, mevcut mesaj işareti koyu üçgen veya taralı üçgen olarak gösterilen şekillerden biri olarak mevcuttur. Yani, orijinal işaret hem koyu hem de taralı üçgendir. Diğer bir deyişle orijinal işareten iki tane oluşmuştur. Buna göre aynı işareti iki kez göndermek gibi biraz lüzümsüz görünen bir proses söz konusudur. Bu anlamda iletim hattının bant genişliği gereksiz halde iki katına çıkarılmaktadır.

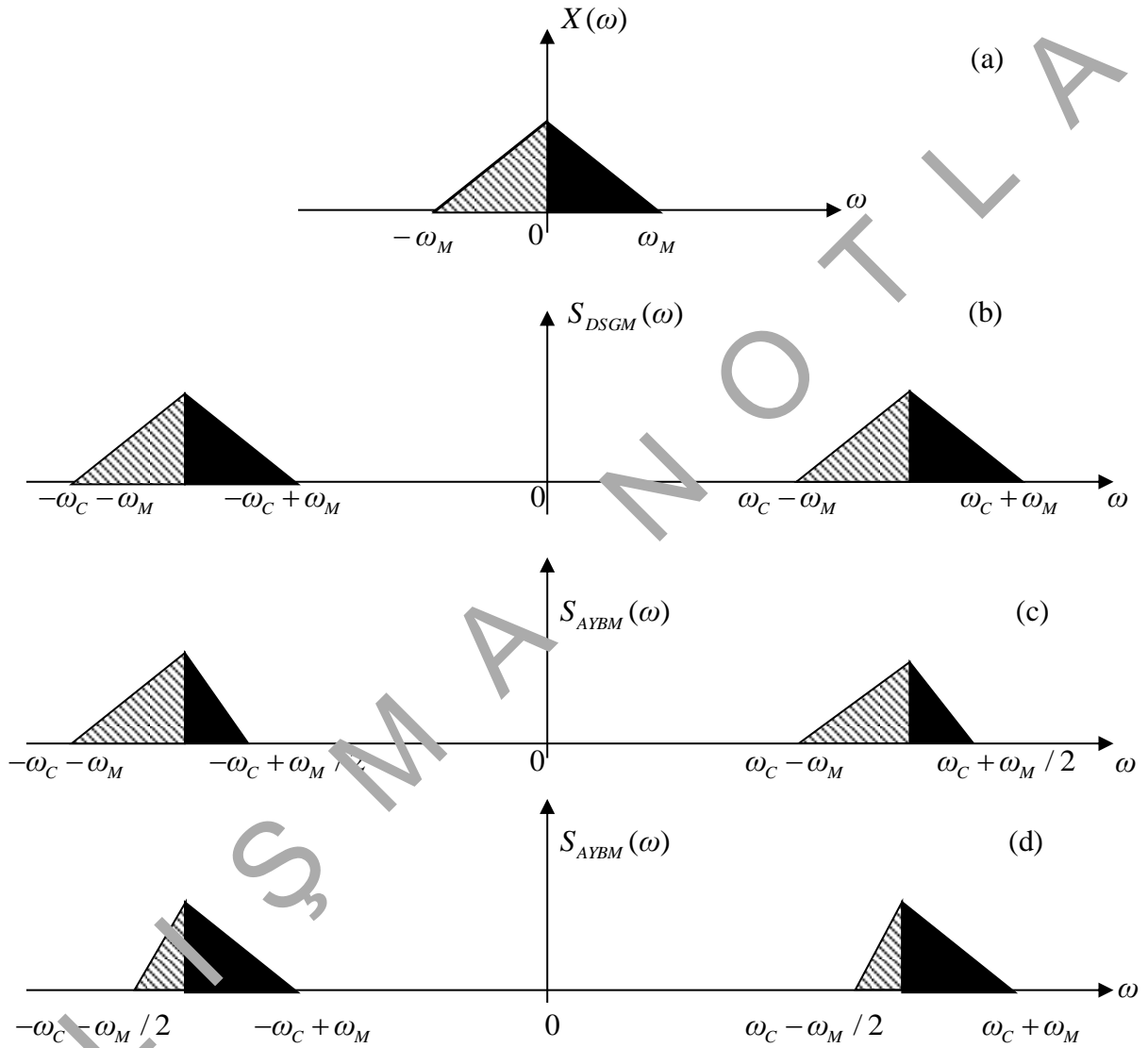
Oysa ki, yalnızca koyu veya taralı üçgenlerden birinin gönderilmesi yeterli olabilirdi. Bu durumda biri gönderildiğinde diğeri gönderilmeyeceğine göre, iletim hattının bant genişliği otomatik olarak yarıya düşerek büyük bir avantaj sağlardı. Şekil (b) de gösterilen klasik genlik modülasyonunda bu olmazken, bu özelliğe sahip benzer modülasyon yöntemi vardır, ve tek yan bant genlik modülasyonu (single side band modulation, SSBM) olarak anılır. Bu bölümde analitik işaret yaklaşımından yararlanılarak şekil (c) veya (d) de gösterilen bu modülasyon türü ele alınacaktır.

Yukarıdaki şekil dikkate alındığında  $x(t)$  reel işaretinin spektrumu  $(-\omega_M, \omega_M)$  olarak (a) da gösterilmiştir. Bu işaretin gönderilmesi için yapılan genlik modülasyonu (b) de gösterilmiştir. Buna göre klasik genlik modülasyonunun yapıldığı (b) dikkate alındığında  $x(t)$  işaretinin gönderilmesi için  $\omega_M - (-\omega_M) = 2\omega_M$  band genişliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak elde edilen  $z(t)$  analitik işaretinin genlik modülasyonunun yapıldığı (c) veya (d) dikkate alındığında ise, (b) deki bantlardan yalnızca birinin söz konusu olduğu görülmektedir. Dolayısıyla (b) deki aynı  $x(t)$  işaretinin gönderilmesi için  $2\omega_M$  bant genişliği gerekirken, analitik işaretin elde edilmesi sonucu yapılan modülasyonda, iletim bant genişliği  $\omega_M$  olarak yarıya düşmüştür. Bu nedenle yarı yarıya avantaj sağlanarak, verinin daha az bir bant genişliğinde gönderilmesi sağlanmıştır. Bunun sonucunda, yüksek miktardaki verileri içeren işaretlerin iletiminde, tek yan band modülasyonu (single side band modulation, SSBM), klasik genlik modülasyonuna göre üstünlük sağlamaktadır.

**Tespit :** Klasik genlik modülasyonu için esas gönderilecek işaretin bant genişliğinin iki katı büyüklüğünde iletim bant genişliği gerekirken, tek yan bant genlik modülasyonunda analitik işaret kullanımı gereği, gerekli iletim bant genişliği yarıya düşmektedir.

### Artık Yan Band Modülasyonu (vestigial side band modulation)

Klasik genlik modülasyonunun bir türevi olan artık yan band modülasyonu özellikle analog televizyon yayıncılığında tercih edilen bir yaklaşımdır. Çift yan band genlik modülasyonundaki yan bantlardan biri tam, biride yarım band olarak gönderilen bir haberleşme türüdür.



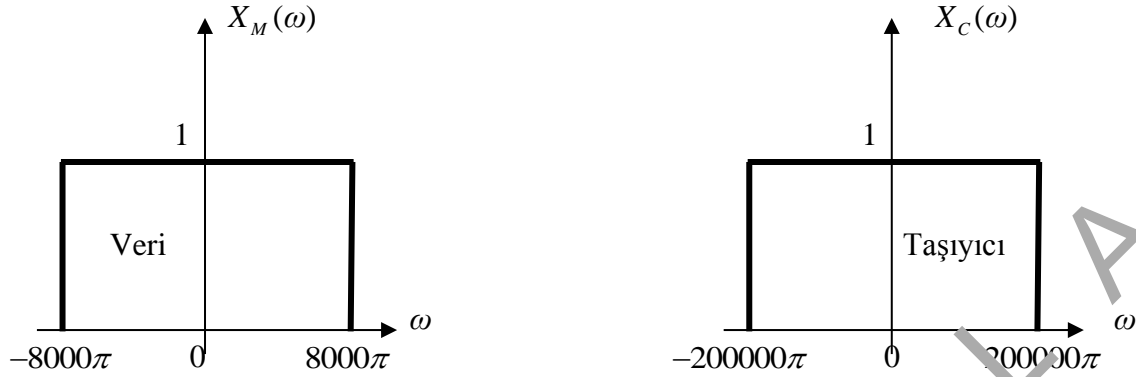
Şekil 13 Çift yan band genlik modülasyonundan artık yan band modülasyonuna geçiş

Modülasyon band genişliği :

1.  $BG = \omega_C + \frac{\omega_M}{2} - (-\omega_C - \omega_M) = \omega_C + \frac{\omega_M}{2} - \omega_C + \omega_M = \frac{3}{2} \omega_M$
2.  $BG = -\omega_C + \omega_M - (-\omega_C - \frac{\omega_M}{2}) = -\omega_C + \omega_M + \omega_C + \frac{\omega_M}{2} = \frac{3}{2} \omega_M$

### Örnek

Aşağıda spektrumları görülen  $x_M(t)$  mesaj işareti  $x_C(t)$  taşıyıcı işaretiyle radyodan yayınlanacaktır.



Şekil 14 Veri ve iletilecek kanalın band genişliklerinin karşılaştırılması

- Yayın çift yan band genlik modülasyonu ile yapılacaksa hangi kanaldan dinlenebilir.
- Yayın tek yan band genlik modülasyonu ile yapılacaksa hangi kanaldan dinlenebilir.
- Yayın artık yan band genlik modülasyonu ile yapılacaksa hangi kanaldan dinlenebilir.

### Çözüm

Şekilden yayının yani mesajın band genişliği ile taşıyıcının band genişlikleri sırasıyla ,

$$2\pi f_M = 8000\pi \rightarrow f_M = 4000 \text{ Hz} = 4 \text{ KHz}$$

$$2\pi f_C = 200000\pi \rightarrow f_C = 100000 \text{ Hz} = 100 \text{ KHz}$$

- Eğer çift yan band modülasyonla yayın aktarılıyorsa yayının band genişliği ,

$$BG = \omega_C + \omega_M - (\omega_C - \omega_M) = \omega_C + \omega_M - \omega_C + \omega_M = 2\omega_M = 2 \times 4 = 8 \text{ KHz}$$

Alt ve üst yan bandlar :

$$BG_U = \omega_C + \omega_M = 100 + 4 = 104 \text{ KHz}$$

$$BG_A = \omega_C - \omega_M = 100 - 4 = 96 \text{ KHz}$$

Buna göre bu yayını 96 – 104 KHz arasında dinleme şansına sahip olacağız.

- Eğer tek yan band modülasyonla yayın aktarılıyorsa yayının band genişliği ,

$$BG = \omega_M = 4 \text{ KHz}$$

Alt ve üst yan bandlar :

$$BG_U = \omega_C + \omega_M = 100 + 4 = 104 \text{ KHz}$$

$$BG_A = \omega_C - \omega_M = 100 - 4 = 96 \text{ KHz}$$

Buna göre bu yayını 96 – 100 KHz veya 100 – 104 KHz bantlarında dinleme şansına sahip olacağız.

c) Eğer artık yan band modülasyonla yayın aktarılıyorsa yayının band genişliği,

$$BG = \omega_M = 4 \text{ KHz}$$

Alt ve üst yan bandlar :

$$BG = \omega_C + \frac{\omega_M}{2} - (\omega_C - \omega_M) = \omega_C + \frac{\omega_M}{2} - \omega_C + \omega_M = \frac{3}{2} \omega_M = \frac{3}{2} 4 = 6 \text{ KHz}$$

$$BG_U = \omega_C + \frac{\omega_M}{2} = 100 + \frac{4}{2} = 100 + 2 = 102 \text{ KHz}$$

$$BG_A = \omega_C - \omega_M = 100 - 4 = 96 \text{ KHz}$$

Buna göre bu yayını 96 – 102 KHz bandında dinleme şansına sahip olacağız.

## AÇI MODÜLASYONU

Bir işaretin genlik ( $A$ ), frekans ( $\omega$ ) ve faz ( $\phi$ ) gibi genel parametrelerini gösteren modelinin,

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad \text{veya} \quad x(t) = A \sin \theta(t)$$

gibi göz önüne alınması durumunda frekans gerekse faz modülasyonları birlikte açılı modülasyonu olarak anılmaktadır. Çünkü genel bir taşıyıcı işaret

$$x_C(t) = A \cos(2\pi f_C t + \phi(t)) = A \cos \theta(t)$$

$$\theta(t) = 2\pi f_C t + \phi(t)$$

biçiminde düşünürsek frekans ve faz modülasyonu  $x_C(t)$  taşıyıcı işaretinin  $\theta(t)$  açısı üzerinde gerçekleşmektedir. Verilen işaretin taşıyıcı işaret olarak verilmesi, bilindiği gibi modülasyonu gerek frekans gerekse faz olarak taşıyıcı üzerinde icra edilmesi gereğidir. Bu nedenle taşıyıcı işaretin frekansı veya fazı modüle edileceği zaman, mesaj işaretinin dikkate alınacağını biliyoruz. Verilen taşıyıcı işaret ifadesinde mesaj işareti bilgisi fazı gösteren  $\phi(t)$  fonksiyonu içerisinde.

$$\phi(t) = k_p m(t)$$

Diğer bir deyişle  $\phi(t)$  faz fonksiyonu  $m(t)$  mesaj bilgisinden elde edilmektedir. Bunun etkisini yukarıda mesaj işaretinin yüksek genliklerinde frekansın düşük, düşük genliklerde ise frekansın yüksek alınmasıyla izah etmiştik. Verilen ifadedeki  $k_p$  faz hassasiyet sabitidir. Bunun bazı değerleri için modülasyon, faz modülasyonu olabilmektedir. Diğer bir deyişle  $k_p$  faz sabiti bir anlamda modülasyonun türünü faz veya frekans olarak belirleyebilme özelliğindeki bir sabittir.

$$\phi(t) = 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau$$

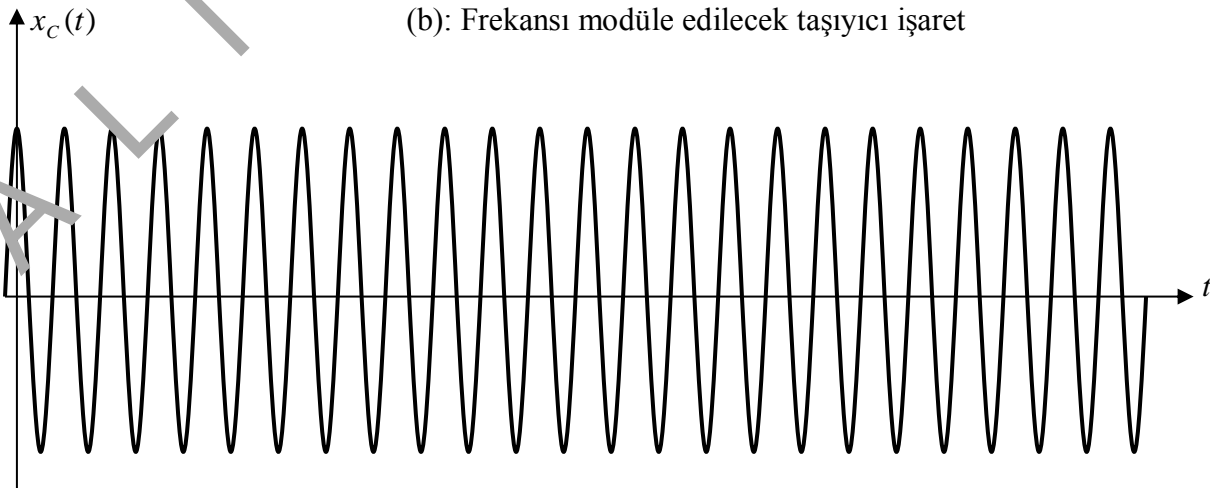
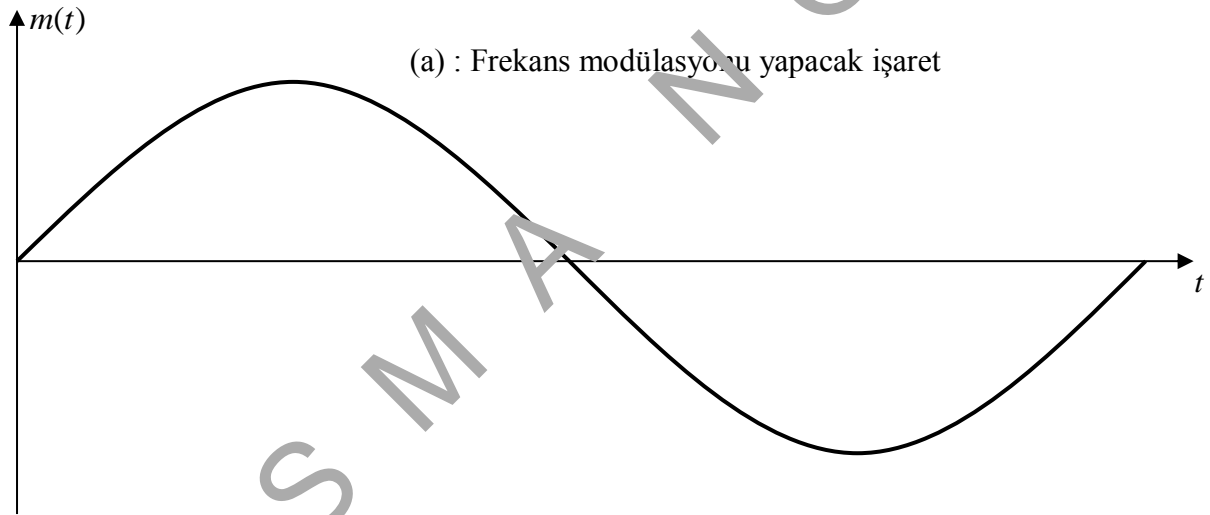
Faz fonksiyonunun bu ifadesinden de  $k_f$  frekans hassasiyet sabitinin bazı değerleri için frekans modülasyonu elde edilmektedir. Buna göre açılı modülasyonlu işaretin anlık frekansı  $\theta(t) = 2\pi f_c t + \phi(t)$  için ,

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt}$$

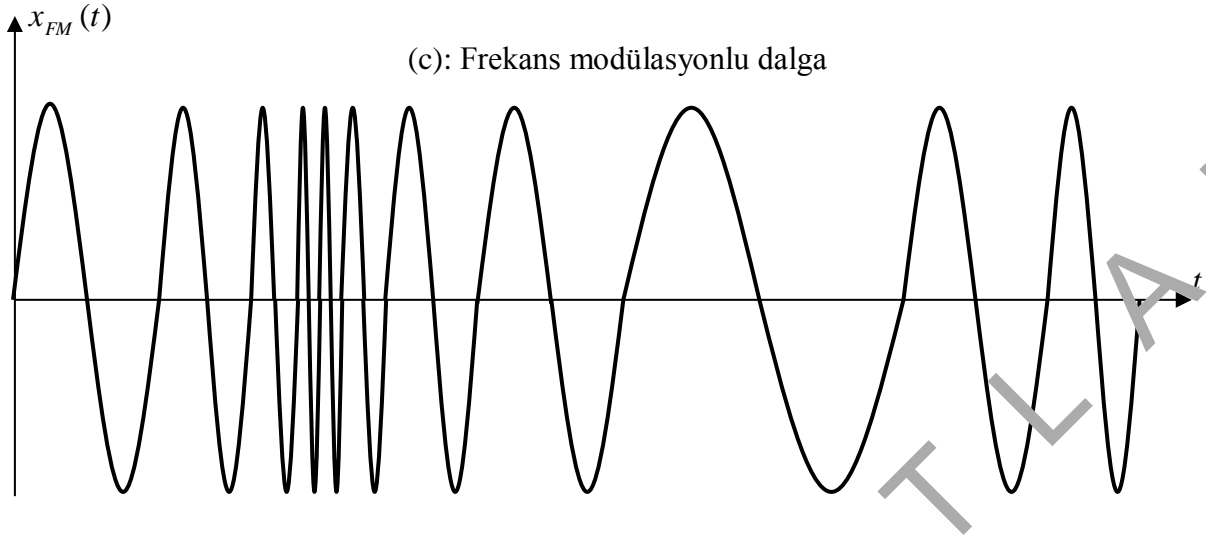
Buna göre frekans ve faz modülasyonu aşağıdaki formlarda düşünülebilir.

$$f_i(t) = \begin{cases} f_c + \frac{k_p}{2\pi} \frac{dm(t)}{dt} & \text{Faz Modülasyonu} \\ f_c + k_f m(t) & \text{Frekans modülasyonu} \end{cases}$$

### 1. Frekans Modülasyonunun Grafik Gösterimi



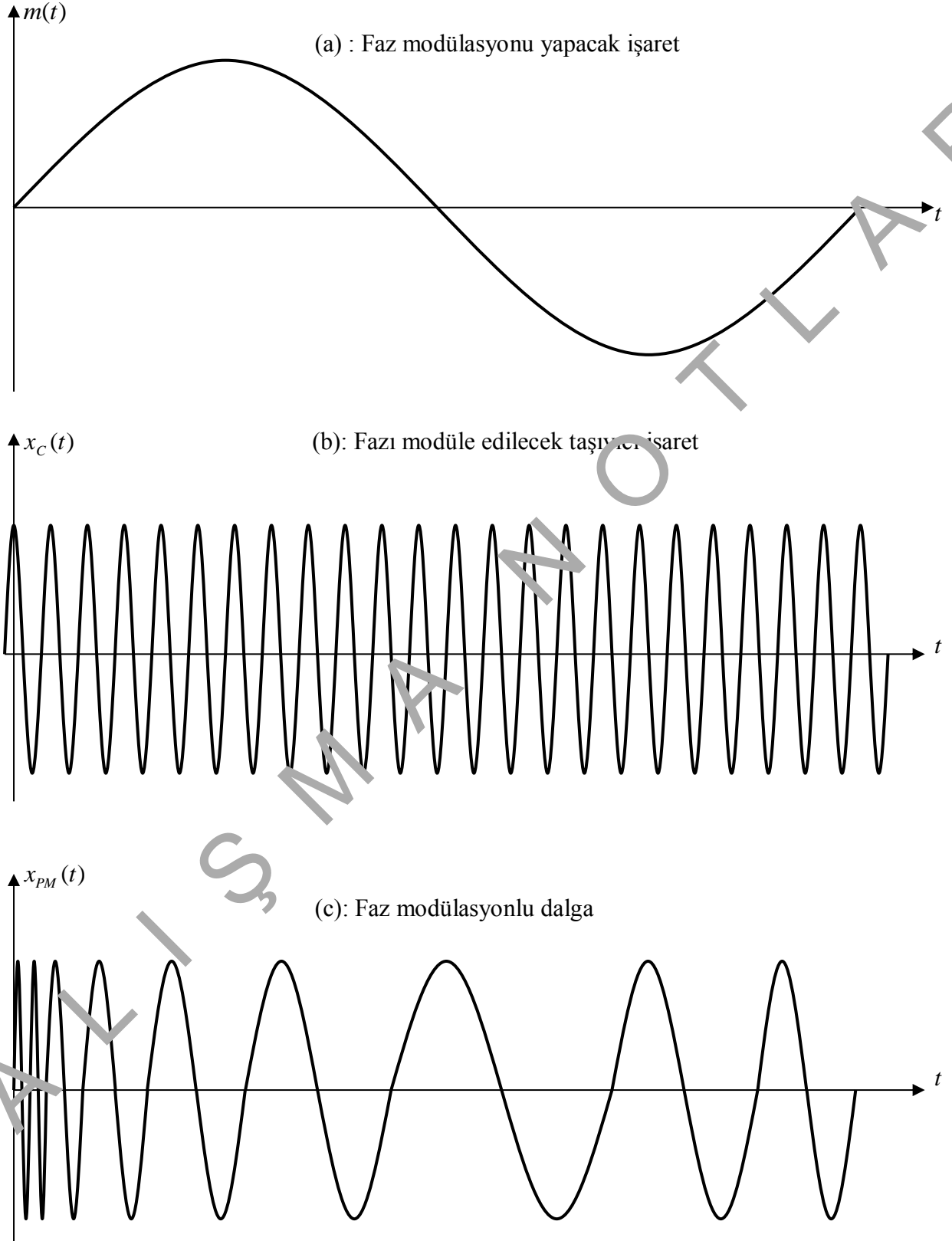




Şekil 15 Frekans modülasyonu

Sonuçta Şekil (a) daki zayıf frekanslı mesaj/bilgi işareti kendi hızıyla ulaşamayacağı noktalara şekil (b) deki daha yüksek frekanslı taşıyıcı işaretlerle erişme imkanına sahip olmuştur. Bunun için yine (b) deki yüksek frekanslı işaret modüle edilmiştir, yani kodlanmıştır (modülasyon). Normalde (b) deki işaret düşük frekanslı ve klasik periodik bir sinüsoidal fonksiyondur. Yani frekansı sabit olup, zamanla değişme özelliği göstermez. Ancak bu işaret (c) deki hale getirilmiştir, diğer bir deyişle kodlanmış veya modüle edilmiştir. Artık (c) deki işaretin (b) ye benzer tarafı, genliğinin aynı olmasına karşın frekansı değişmiştir. Daha doğrusu frekansı zamanla değişir hale gelmiştir. Bu şekle bakıldığında ilgili period içersindeki her andaki frekans değerinin farklı olduğunu, dolayısıyla zamanla değişir olduğunu gözlemlemekteyiz. Bu değişimin sebebi, (a) daki zayıf frekanslı bilgi işaretini üzerine alması gereğidir. Dikkat edilirse, (c) deki modüle edilmiş taşıyıcı işaret, (a) daki işaretin genliğinin yüksek olduğu noktalarda düşük frekanslarda, mesaj işaretinin genliğinin düşük olduğu noktalarda ise yüksek frekanslarda değişim göstermektedir. Frekans modülasyonu bu yolla gerçekleşmektedir. Dolayısıyla (c) deki işaret de artık mesaj ve taşıyıcı işaretin bir arada bulunduğu bileşik bir işaret veya dalgadır. Mesaj işaretinin bu yolla taşıyıcı işaret üzerine bindirilmesi prosesine bu kez frekans modülasyonu denilmektedir. Modülasyon taşıyıcı işaretin frekansının değiştirilmesi yoluyla yapıldığından söz konusu modülasyon da frekans modülasyonu olarak anılır.

## 2. Faz Modülasyonunun Grafik Gösterimi

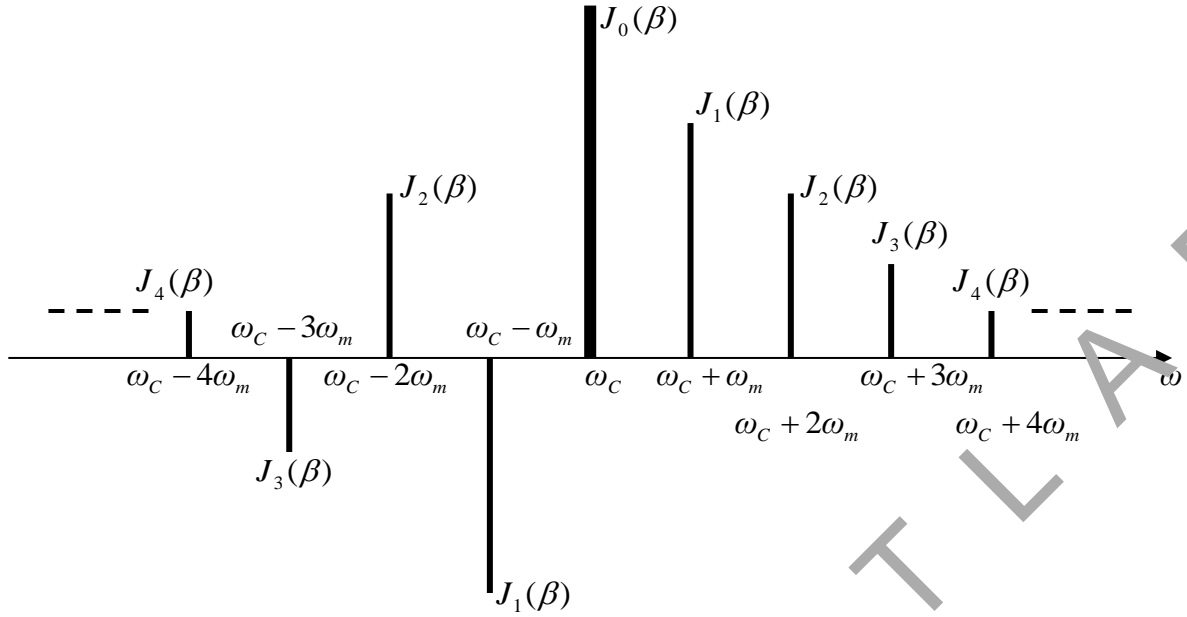


Şekil 16 Faz modülasyonu

Şekilden ilk farkedilenin, faz modülasyonunun bir tür frekans modülasyonu olmasıdır. Bu nedenle frekans ve faz modülasyonu bir birleriyle ilintili ve birbirlerini etkileyen modülasyon türleridir. Faz modülasyonu Şekil (a) daki zayıf frekanslı mesaj/bilgi işareti kendi hızıyla ulaşamayacağı noktalara Şekil (b) deki daha yüksek frekanslı taşıyıcı işaret ile erişme imkanına sahip olmuştur. Bunun için diğerleri gibi yine (b) deki yüksek frekanslı işaret modüle edilmiştir, yani kodlanmıştır (modülasyon). Normalde (b) deki işaret düşük frekanslı ve klasik periodik bir sinüsoidal fonksiyondur. Yani genlik ve frekansı gibi fazı da sabit olup, zamanla değişme özelliği göstermez. Ancak bu işaret (c) deki hale getirilmiştir, diğer bir deyişle kodlanmış veya modüle edilmiştir. Artık (c) deki işaretin (b) ye benzer tarafı, genliğinin aynı olmasına karşın fazı değişmiştir (frekans konusunda ise, frekansı da değişmiştir, çünkü faz değişimi frekansı da etkilemektedir). Daha doğrusu fazı zamanla değişir hale gelmiştir. Bu şekilde bakıldığında ilgili period içerisindeki her andaki faz (dolayısıyla frekans) değerinin farklı olduğunu, dolayısıyla zamanla değişir olduğunu gözlemlemekteyiz. Bu değişimin sebebi, (a) daki zayıf frekanslı bilgi işaretini üzerine alması gereğidir. Dikkat edilirse, (c) deki modüle edilmiş taşıyıcı işaret, (a) daki işaretin genliğinin yüksek olduğu noktalarda yüksek frekanslarda, mesaj işaretinin genliğinin düşük olduğu noktalarda ise düşük frekanslarda değişim göstermektedir. Faz modülasyonu bu yolla gerçekleşmektedir. Dolayısıyla (c) deki işaret de artık mesaj ve taşıyıcı işaretin bir arada bulunduğu bileşik bir işaret veya dalgadır. Mesaj işaretinin bu yolla taşıyıcı işaret üzerine binirilmesi prosesine bu kez faz modülasyonu denilmektedir. Modülasyon taşıyıcı işaretin fazının değiştirilmesi yoluyla yapıldığından söz konusu modülasyon da faz modülasyonu olarak anılır.

### Frekans Modülasyonu Spektrumu Üzerine

Genlik modülasyonu frekans ve fazın sabit tutulduğu yalnızca genliğin zamanla değişimi üzerine kurulu bir modülasyon biçimi olduğundan basit yapıdadır. Buna karşın bir işaretin gürültü gibi dış etkenlerden en çok etkilenen parametresinin genlik oluşuda bu modülasyon biçiminin handikapıdır. Buna karşın  $B$  band genişliğindeki bir  $x(t)$  işaretinin iletimi için, iki kat  $(2B)$  band genişliğine ihtiyaç duyulduğunu bilmekteyiz. Öte yandan frekans modülasyonunda bu kez genliğin sabit tutularak frekansın zamanla değiştirildiğini görmekteyiz. Bu yolla işaretin dış etkenlere maruz kalabilecek genliğinin sabit tutulması önemlidir. Ancak frekans modülasyonlu işaretin iletimi için gereken band genişliği maalesef işaretin band genişliğinin iki katı kadar değildir, daha da fazladır. Bu açıdan bir örnek frekans spektrumu aşağıda verilmiştir.



Şekil 17 Frekans modülasyon spektrumu

Görüldüğü gibi spektrumda  $x(t)$  işaretinin band genişliğinde ötesinde ekstra frekanslar söz konusudur. Yani beklenenden daha fazla frekans bileşeni söz konusudur. **Bu durum doğal olarak frekans modülasyonlu işaretin band genişliğini artıracaktır.** Bunu karşılamak üzere, iletim hattının band genişliğinin de büyük olması gerekecektir. Genlik modülasyonunun maruz kaldığı genliğin gürültüden etkilenmesi olayı frekans modülasyonlu işaretlerde olmaması önemli avantaj oluştururken, çok geniş band gerektirmesi, frekans modülasyonunun en önemli handikabıdır.