
Haberleşme Mühendisliği

Ders 2: Genlik Modülasyonu

1 / 10

Dr. Hakkı Soy

- Kablosuz haberleşme sistemlerinde anten uzunluğunun kısaltılması için modülasyon yapılmasına ihtiyaç vardır. Modülasyon ile mesaj sinyali frekansı, taşıyıcı sinyal frekansına yükseltilerek çoğullama yapılmasına imkan sağlanır. Böylece birden fazla sayıda mesaj sinyali eş zamanlı olarak kanal üzerinden gönderilebilir.
- Mesaj sinyalinin analog veya dijital formda olması dikkate alınarak analog ve dijital olmak üzere iki farklı şekilde modülasyon yapılabilir.
 - **Analog modülasyon** uygulanması durumunda taban bant sinyali (ses, video vb.) doğrudan kanal üzerinden nakledilecek mesaj sinyaline çevrilir.
 - **Dijital modülasyon** uygulanması durumunda analog taban bant sinyali önce ikilik olarak kodlanır ve daha sonra kanal üzerinden nakledilecek mesaj sinyaline çevrilir.

Analog Modülasyon

- Analog modülasyon **sürekli dalga modülasyonu** (continuous-wave modulation) ve **darbe modülasyonu** (pulse modulation) olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilir.
- Sürekli dalga modülasyonu ise **doğrusal modülasyon** (genlik modülasyonu) ve **açı modülasyonu** (frekans ve faz modülasyonu) olarak uygulanabilir.
- Analog modülasyon uygulamasında çoğunlukla sinüzoidal dalga (sinüs veya kosinüs sinyali) formundaki taşıyıcı sinyalin **genlik** (amplitude), **faz** (phase) ve **frekans** (frequency) parametreleri değiştirilir. Seçilen parametreye bağlı olarak **genlik modülasyonu (AM)**, **faz modülasyonu (PM)** ve **frekans modülasyonu (FM)** elde edilir.

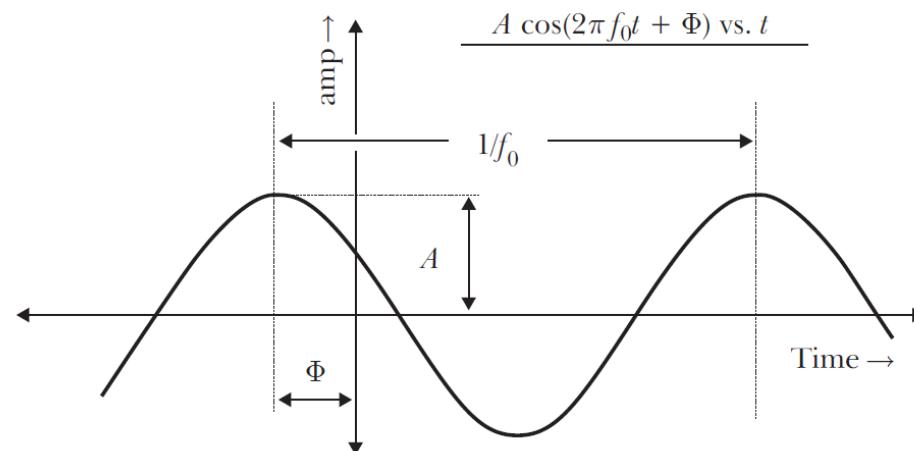
Taşıyıcı Sinyal

- Analog modülasyon uygulandığında **taşıyıcı** olarak genellikle osilatör devresi tarafından üretilen **sinüzoidal sinyal** kullanılır. Sinüzoidal formada taşıyıcı sinyal matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$v = V_p \sin (2\pi f t + \theta)$$

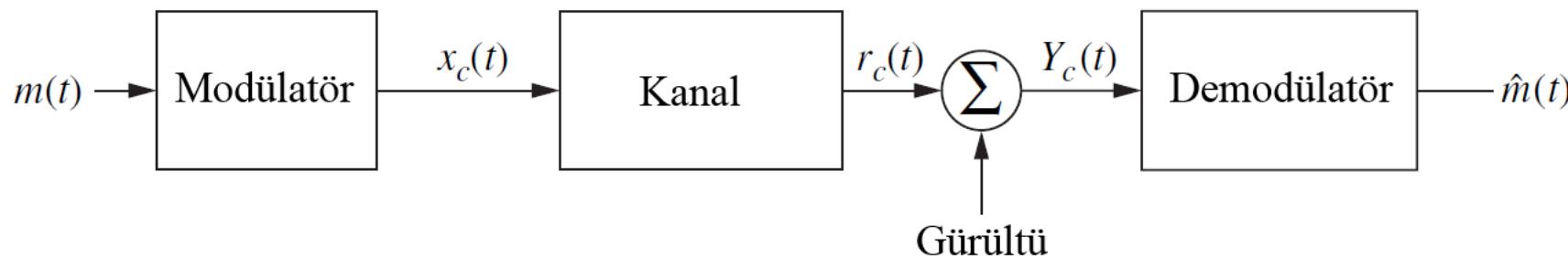
$$v = V_p \sin (\omega t + \theta)$$

- Burada v sinüs dalga şeklinde sinyalin (akım veya gerilim) anlık değerini, V_p tepe değeri, f frekansı (Hz), $w = 2\pi f$ açısal frekansı, t zamanı (s) ve θ faz açısını göstermektedir.



Analog Haberleşme Sistemi

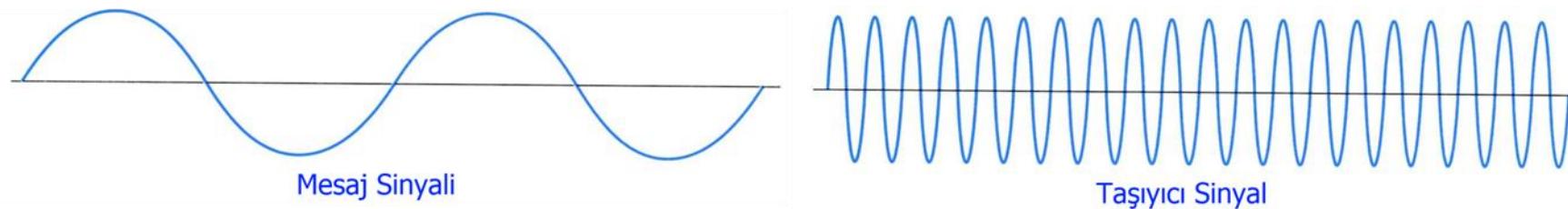
- Genel bir **analog haberleşme sistemi** aşağıda gösterilmiştir.



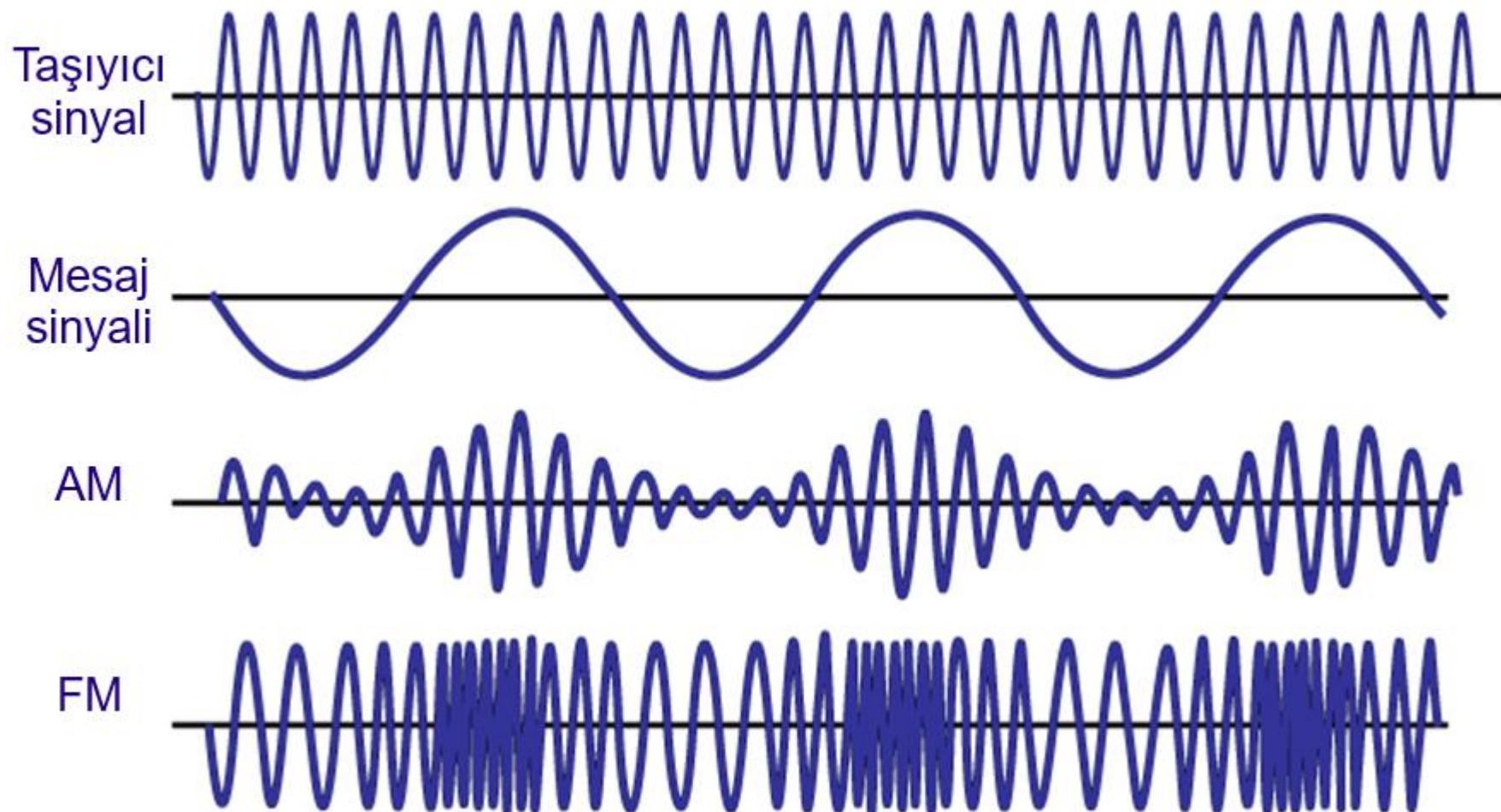
- Analog formda taban bant **gönderilen mesaj sinyali** $m(t)$, modülatörde **taşıyıcı sinyal** üzerine bindirilir ve **gönderilen sinyal** $x_c(t)$ üretir.
- Alıcı tarafından **alınan sinyal** $y_c(t)$, demodülatörde **taşıyıcı sinyal**den ayrıılır ve **alınan mesaj sinyali** $\hat{m}(t)$ elde edilir.
- Kanal üzerindeki gürültü sebebiyle vericiden gönderilen mesaj sinyali $m(t)$, alıcıya bozularak ulaşır $\hat{m}(t)$.

Analog Modülasyon Teknikleri

- Analog modülasyon, yüksek frekanslı taşıyıcı sinyalin genlik, frekans ve faz gibi özelliklerinin düşük frekanslı bilgi sinyaline bağlı olarak değiştirilmesi işlemidir. Mesaj sinyali kullanılarak taşıyıcı sinyalin;
 - Genliği değiştirilirse, **genlik modülasyonu** (amplitude modulation, AM),
 - Frekansı değiştirilirse, **frekans modülasyonu** (frequency modulation, FM),
 - Fazı değiştirilirse, **faz modülasyonu** (phase modulation, PM) gerçekleştirilir.
- Frekans ve faz modülasyonları, **açı modülasyonu** (angle modulation) olarak gruplandırılır.

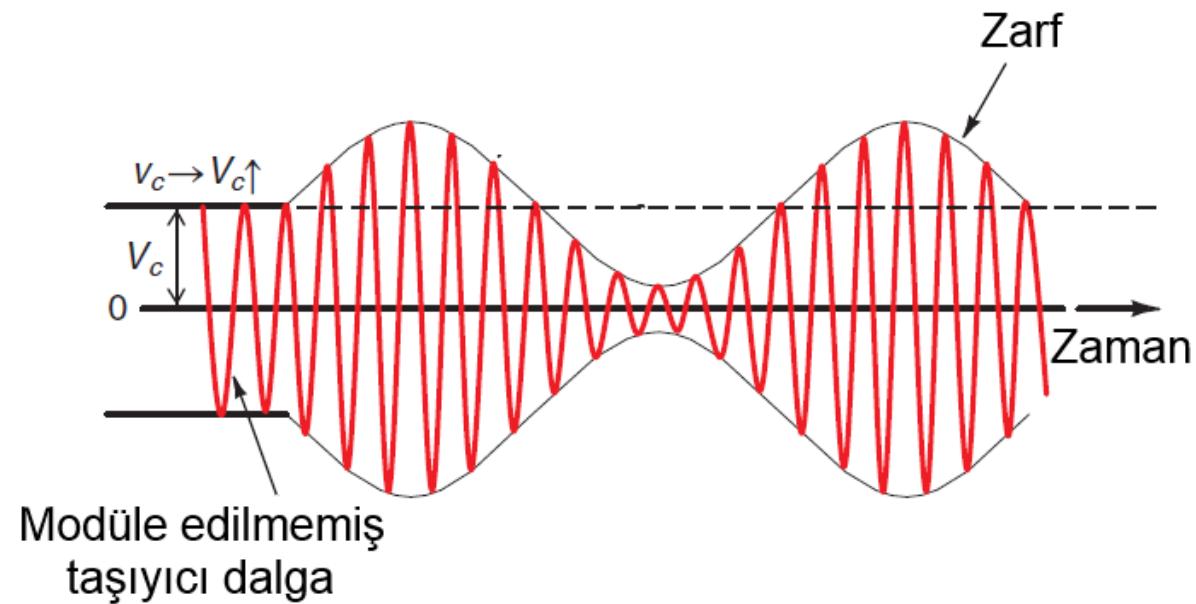


Analog Modülasyon Teknikleri



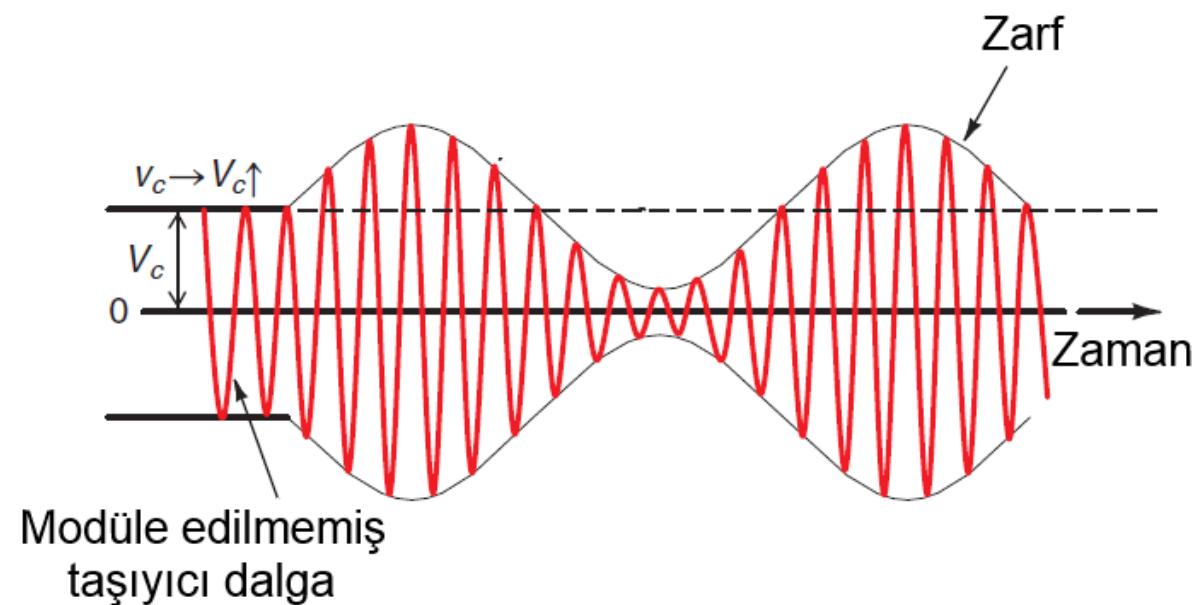
Genlik Modülasyonu

- Genlik modülasyonu ile modüle edilmiş sinyallerin algılanması çok kolay olduğu için ilk radyo yayını genlik modülasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Sinüs dalgası şeklinde taşıyıcı sinyalin genliği, aşağıda gösterildiği gibi mesaj sinyalinin anlık değerine göre değiştirilir. Dikkat edilirse taşıyıcı sinyalin frekans ve faz değerleri genlik modülasyon işlemi uygulandığında sabit kalır.



Genlik Modülasyonu

- Modüle edici mesaj sinyalinin genliği arttığında, taşıyıcı sinyal genliği de artar, azaltıldığında ise azalır. Taşıyıcı sinyal pozitif ve negatif değerler aldığında, genliği mesaj sinyaline bağlı olarak aşağıdaki gibi değişir. Pozitif tepe değerleri ve negatif değerleri bağlayan hayali çizgi modüle edilmiş sinyalin dalga şeklini verir. Taşıyıcı sinyalin bu tam dalga şekli **zarf** (envelope) olarak isimlendirilir.



Genlik Modülasyonu

- Taşıyıcı ve mesaj sinyalleri trigonometrik fonksiyonlar kullanılarak gerilimin zamana göre değişimi şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\text{Mesaj sinyali } v_m = V_m \sin 2\pi f_m t$$

$$\text{Taşıyıcı sinyal } v_c = V_c \sin 2\pi f_c t$$

- Taşıyıcı sinyalin tepe değeri, modüle edici mesaj sinyali için referans noktasıdır. Modülatör çıkışında gözlemlenen sinyalin herhangi bir noktada değeri, taşıyıcı sinyal tepe değerine mesaj sinyali eklenerek yada çıkarılarak bulunur.
- Mesaj sinyali genliğinin, taşıyıcı sinyal genliğinden küçük olduğu $V_m \leq V_c$ varsayılırsa, modülasyonlu sinyal zarfının anlık genlik değeri aşağıdaki gibidir:

$$v_1 = V_c + v_m = V_c + V_m \sin 2\pi f_m t$$

Taşıyıcı sinyal genlik tepe değerine, mesaj sinyalinin anlık değeri eklenir.

$$\begin{aligned} v_{\text{AM}} &= v_1 \sin 2\pi f_c t = (V_c + V_m \sin 2\pi f_m t) \sin 2\pi f_c t \\ &= V_c \sin 2\pi f_c t + (V_m \sin 2\pi f_m t) (\sin 2\pi f_c t) \end{aligned}$$

Elde edilen genlik değeri taşıyıcı sinyal sinüzoidal bileşeniyle çarpılır.

Genlik Modülasyonu

- Genlik modülasyonlu sinyal matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$v_{AM} = v_1 \sin 2\pi f_c t = (V_c + V_m \sin 2\pi f_m t) \sin 2\pi f_c t = V_c \sin 2\pi f_c t + (V_m \sin 2\pi f_m t) (\sin 2\pi f_c t)$$

$$\sin x \cdot \sin y = \frac{1}{2} [\cos(x - y) - \cos(x + y)]$$

$$v_{AM} = V_c \sin 2\pi f_c t + \frac{V_m}{2} \cos 2\pi(f_c - f_m)t - \frac{V_m}{2} \cos 2\pi(f_c + f_m)t$$

$$v_{AM} = \boxed{V_c \sin w_c t} + \boxed{\frac{V_m}{2} \cos(w_c - w_m)t} - \boxed{\frac{V_m}{2} \cos(w_c + w_m)t}$$

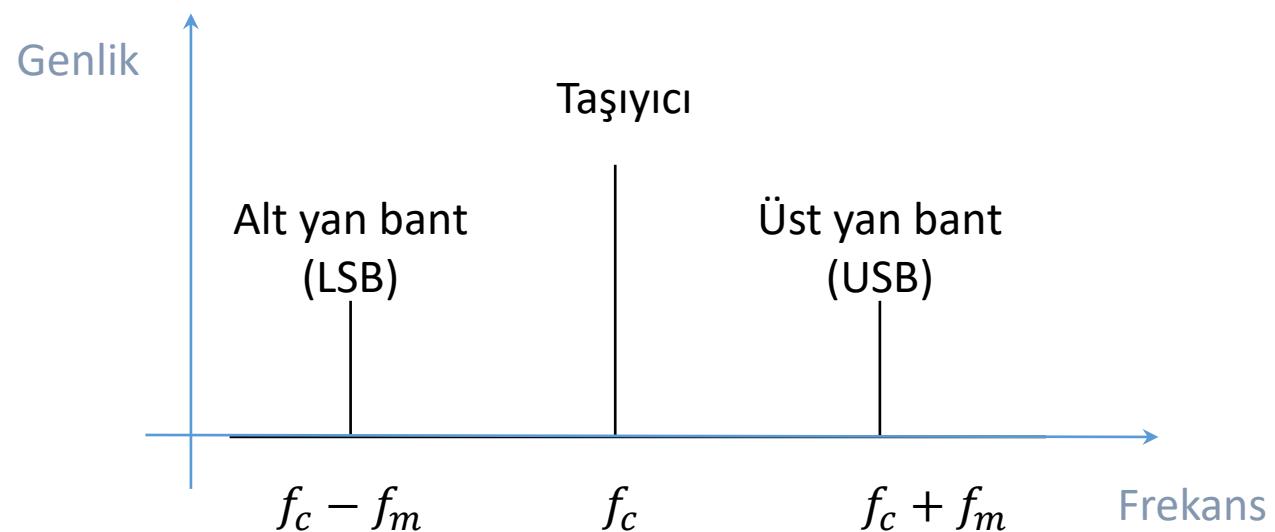
Taşıyıcı sinyal

Alt yan bant

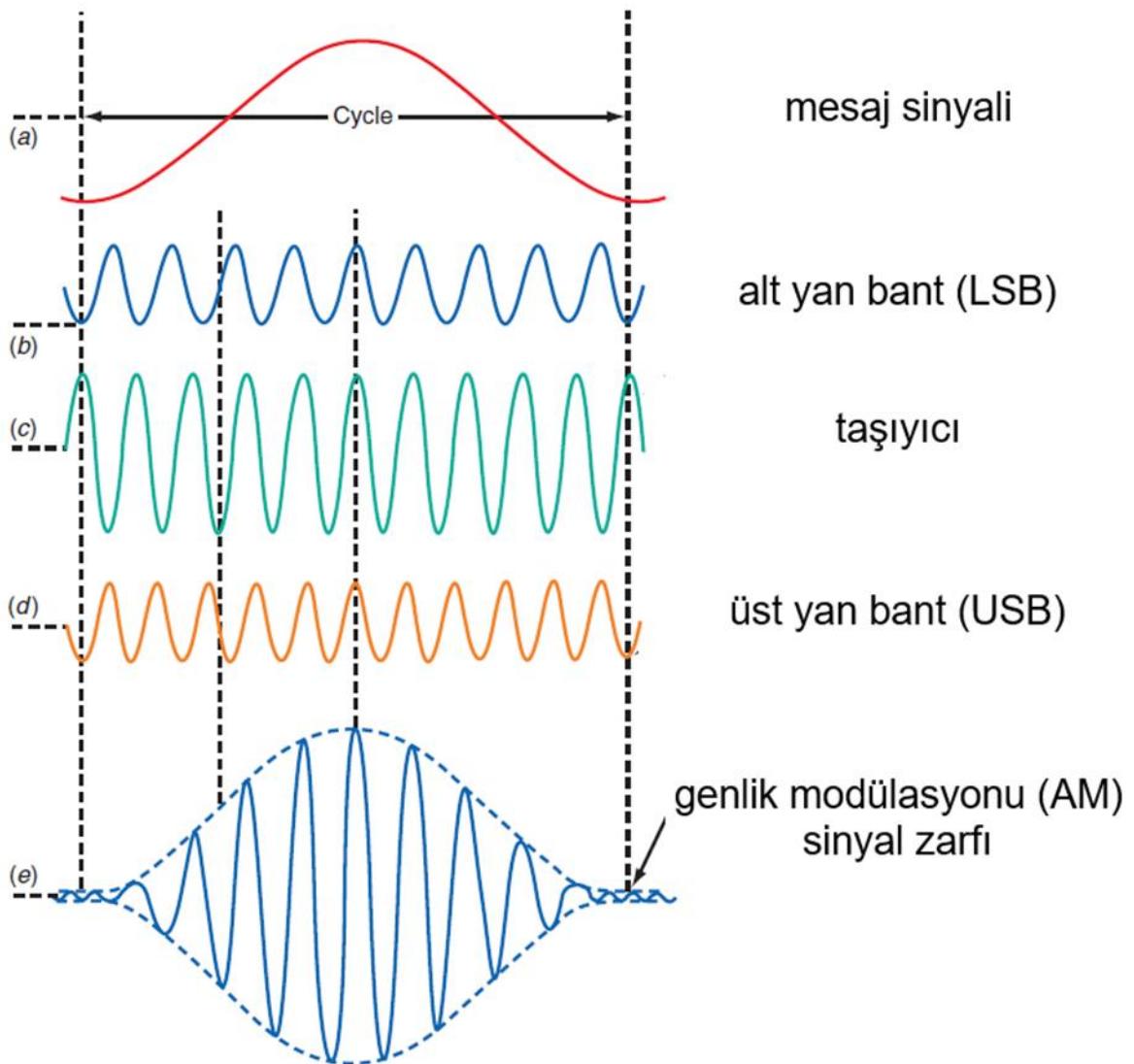
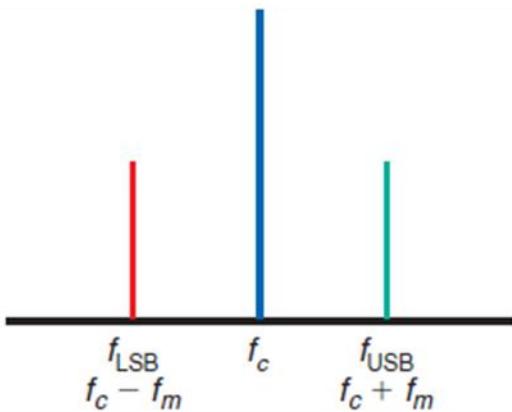
Üst yan bant

Genlik Modülasyonu

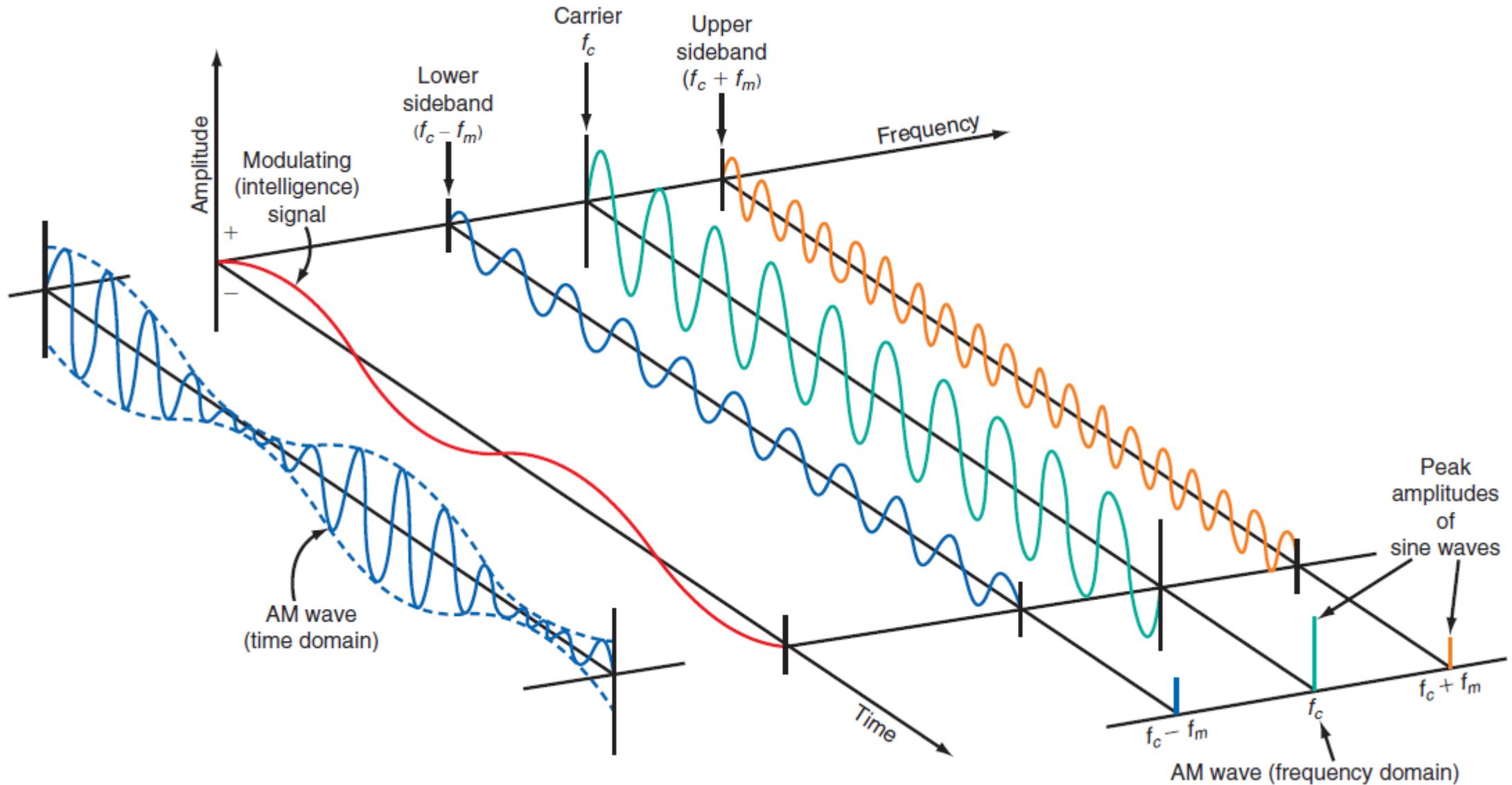
- Genlik modülasyonlu sinyal spektrum analizörü (spectrum analyzer) olarak isimlendirilen cihaz kullanılarak frekans alanında incelendiğinde üç bileşenden meydana gelir: **taşıyıcı sinyalin kendisi, alt yan bant (LSB) ve üst yan bant (USB)**.
- Mesaj sinyalinin genlik modülasyonu ile alıcıya iletilmesi için gerekli olan bant genişliği, mesaj sinyalinin bant genişliğinin iki katıdır. Genlik modülasyonunun en önemli dezavantajlarından biri bant genişliği bakımından verimsiz olmasıdır.



Genlik Modülasyonu



Genlik Modülasyonu



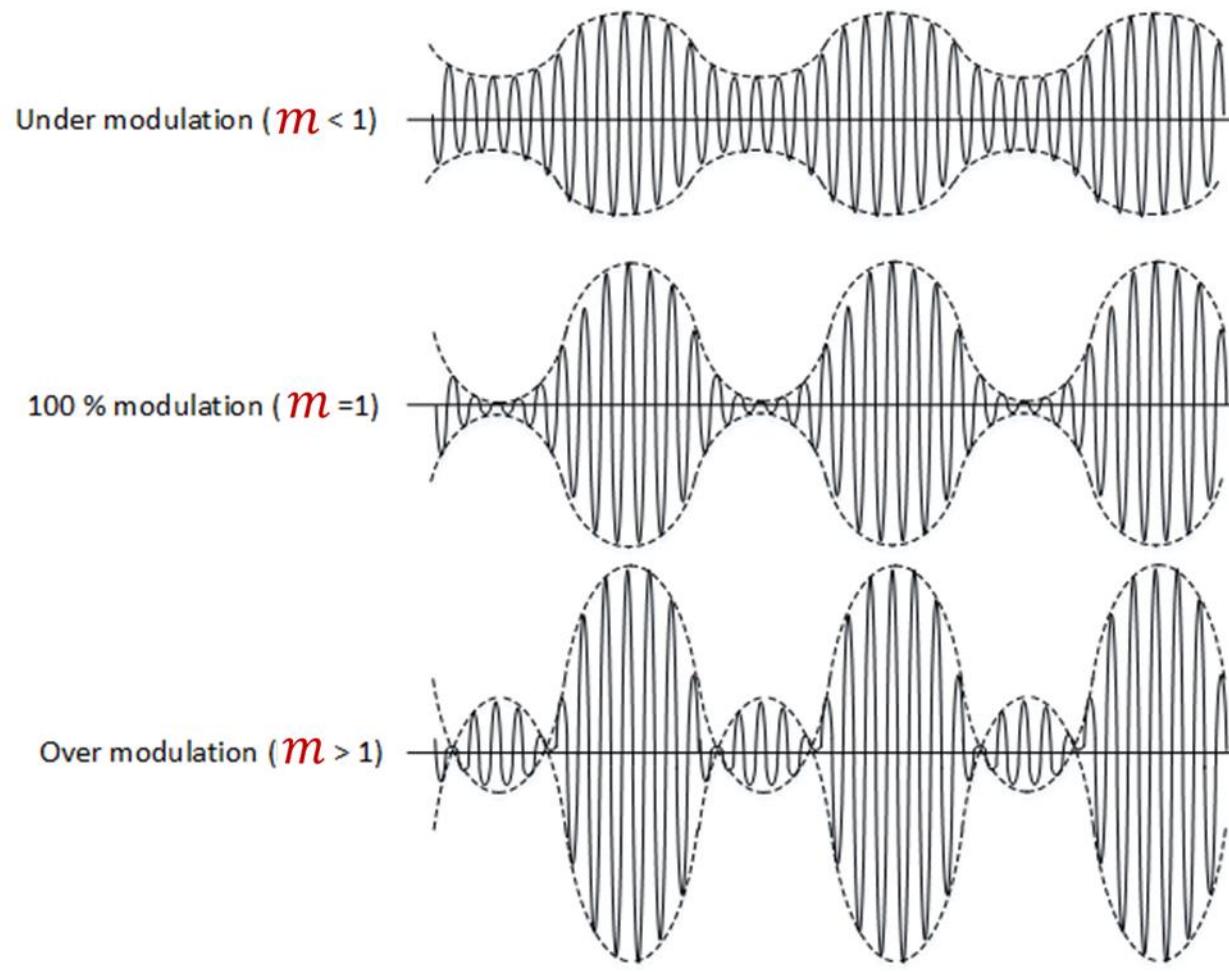
Modülasyon İndisi

- Mesaj sinyali genliğinin, taşıyıcı sinyal genliğine oranı modülasyon indisi (modulation index) olarak isimlendirilir. Modülasyon indisi bazen modülasyon derecesi, modülasyon katsayısı ve modülasyon faktörü olarak da isimlendirilir. Modülasyon indisi 100 ile çarpıldığında modülasyon yüzdesi hesaplanır.

$$m = \frac{V_m}{V_c}$$

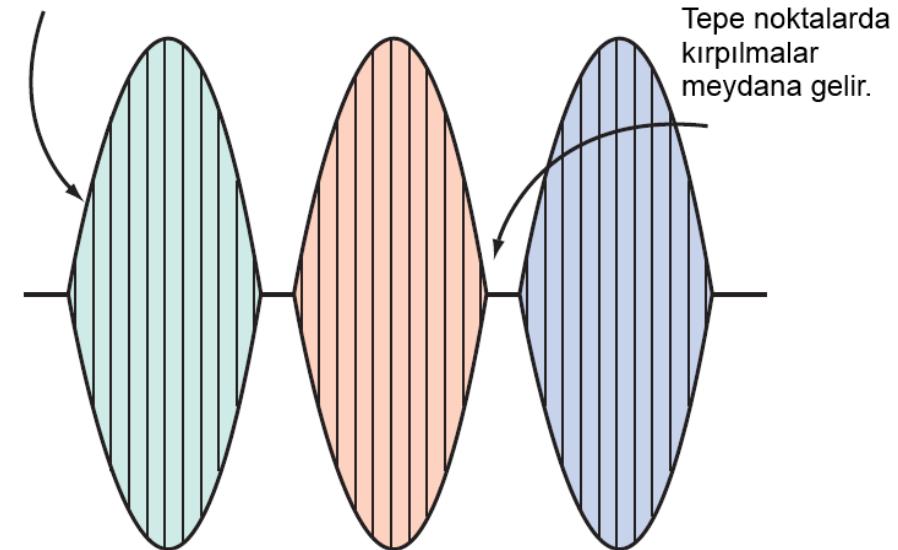
- Modülasyon indisi 0 ile 1 arasında değer alır. Fakat mesaj sinyali genliğinin taşıyıcı sinyal genliğinden büyük olması $V_m > V_c$ durumunda modülasyon indisi 1'den büyütür. Bu durum aşırı modülasyon (overmodulation) olarak isimlendirilir ve modüle edilmiş sinyalin dalga şekli bozulur.

Modülasyon İndisi



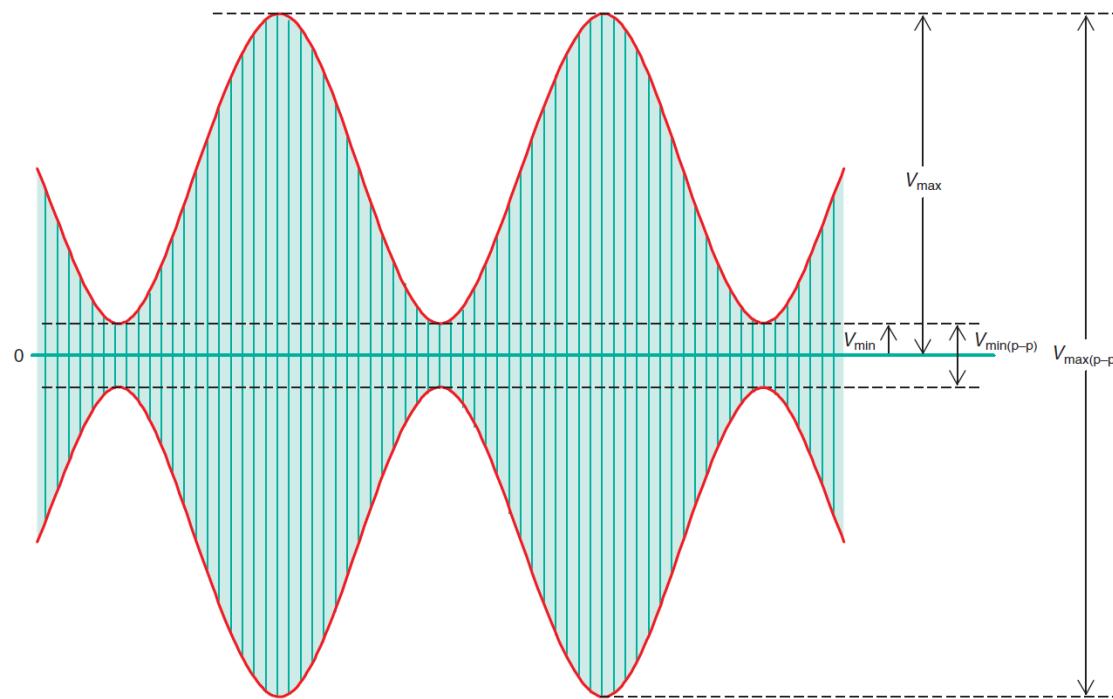
Aşırı Modülasyon (Over Modulation)

Modüle edilmiş sinyal zarfı, mesaj sinyali ile aynı şekilde değildir.



Modülasyon İndisi

- Modülasyon indisi modüle edilmiş sinyal zarfı üzerinde gerilim değerleri ölçülerek hesaplanabilir.



$$V_m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2}$$

$$V_c = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}$$

$$m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}}$$

$$V_m = V_c \longrightarrow m = 1$$

Uygulama 1

- Osiloskop ekranında görüntülenen bir AM sinyali için $V_{\max(p-p)}$ değeri 5.9 bölme ve $V_{\min(p-p)}$ değeri 1.2 bölmeye karşılık geliyor. Her bölme dikey skalada 2 Volt değerine karşılık geliyorsa modülasyon indisi ile mesaj sinyali ve taşıyıcı sinyal genliklerini hesaplayın?

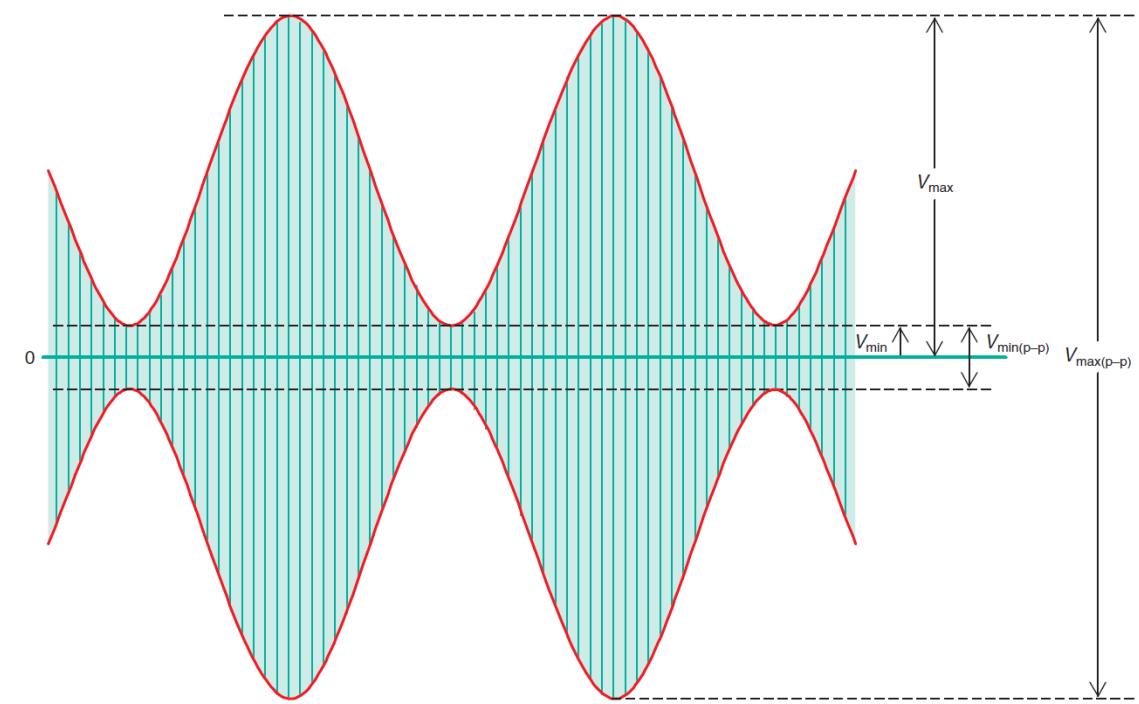
$$m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}} = \frac{5.9 - 1.2}{5.9 + 1.2} = \frac{4.7}{7.1} = 0.662$$

$$V_c = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} = \frac{5.9 + 1.2}{2} = \frac{7.1}{2} = 3.55 \text{ @ } \frac{2 \text{ V}}{\text{div}}$$

$$V_c = 3.55 \times 2 \text{ V} = 7.1 \text{ V}$$

$$V_m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} = \frac{5.9 - 1.2}{2} = \frac{4.7}{2} = 2.35 \text{ @ } \frac{2 \text{ V}}{\text{div}}$$

$$V_m = 2.35 \times 2 \text{ V} = 4.7 \text{ V} \quad m = \frac{V_m}{V_c} = \frac{4.7}{7.1} = 0.662$$



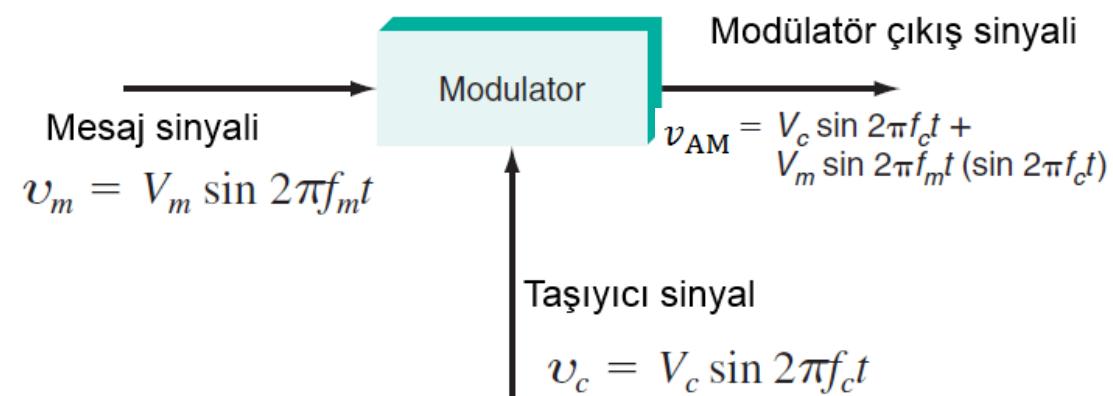
Genlik Modülasyonu

- Modülasyon indisi kullanılarak modülatör çıkışında gözlemlenen sinyal matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$v_{AM} = (V_c + V_m \sin 2\pi f_m t) \cdot \sin 2\pi f_c t = V_c (1 + m \sin 2\pi f_m t) \cdot \sin 2\pi f_c t$$

$$v_{AM} = V_c \sin 2\pi f_c t + \frac{m V_c}{2} \cos 2\pi(f_c - f_m)t - \frac{m V_c}{2} \cos 2\pi(f_c + f_m)t$$

$$v_{AM} = V_c \sin w_c t + \frac{m V_c}{2} \cos(w_c - w_m)t - \frac{m V_c}{2} \cos(w_c + w_m)t$$



Uygulama 2

- Frekansı 10 MHz ve tepe değeri 10 Volt olan taşıyıcı sinyal, frekansı 5 KHz ve genliği 6 Volt olan mesaj sinyali ile modüle ediliyor. Modülasyon indisini bulun ve spektrumunu çizin?

Modülasyon indisı $m = \frac{6}{10} = 0,6$

Frekans

Alt yan bant (LSB) $10 - 0,005 = 9,995 \text{ MHz}$

Üst yan bant (USB) $10 + 0,005 = 10,005 \text{ MHz}$

Taşıyıcı 10 MHz

$$v_{AM} = V_c \sin w_c t + \frac{V_m}{2} \cos(w_c - w_m)t - \frac{V_m}{2} \cos(w_c + w_m)t$$

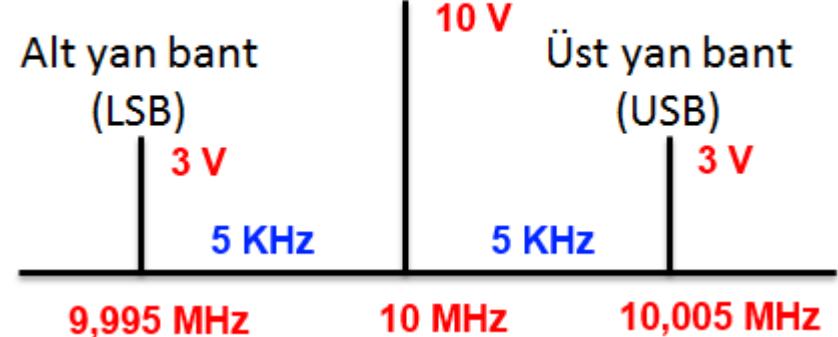
Taşıyıcı sinyal Alt yan bant Üst yan bant

Genlik

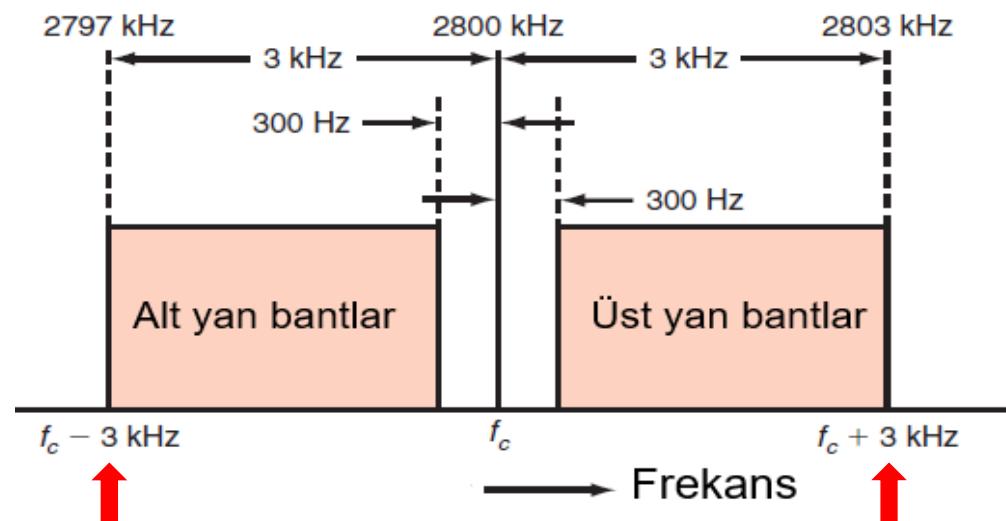
$$\frac{1}{2}V_m = \frac{m}{2}V_c = 3 \text{ V}$$

$$V_c = 10 \text{ V}$$

Taşıyıcı



- Eğer çoğullama yapılarak birden fazla sayıda frekansta sinyal genlik modülasyonu ile gönderiliyorsa frekans sayısı kadar alt ve üst yan bant oluşur. Örneğin ses sinyali 300-3000 Hz frekans aralığında farklı frekanslarda çok sayıda bileşenden oluşur. Ses sinyalinin genlik modülasyonu ile gönderilmesi durumunda toplam bant genişliği yan bant sinyallerinin maksimum ve minimumu yardımıyla hesaplanır. Bant genişliği, en yüksek frekansa sahip bileşenin iki katıdır.



$$f_{\text{USB}} = 2800 + 3 = 2803 \text{ kHz}$$

$$f_{\text{LSB}} = 2800 - 3 = 2797 \text{ kHz}$$

$$\text{BW} = f_{\text{USB}} - f_{\text{LSB}} = 2803 - 2797 = 6 \text{ kHz}$$

$$\text{BW} = 2(3 \text{ kHz}) = 6 \text{ kHz}$$

Uygulama 3

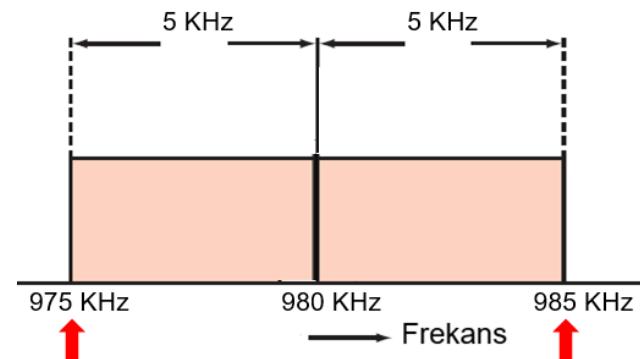
- Standart genlik modülasyonu ile yayın yapan radyo istasyonunun maksimum 5 KHz'e kadar frekansta çalışmasına izin veriliyor. Alt ve üst yan bantların minimum ve maksimum değerleri ile bant genişliğini hesaplayın?

$$f_{\text{USB}} = 980 + 5 = 985 \text{ kHz}$$

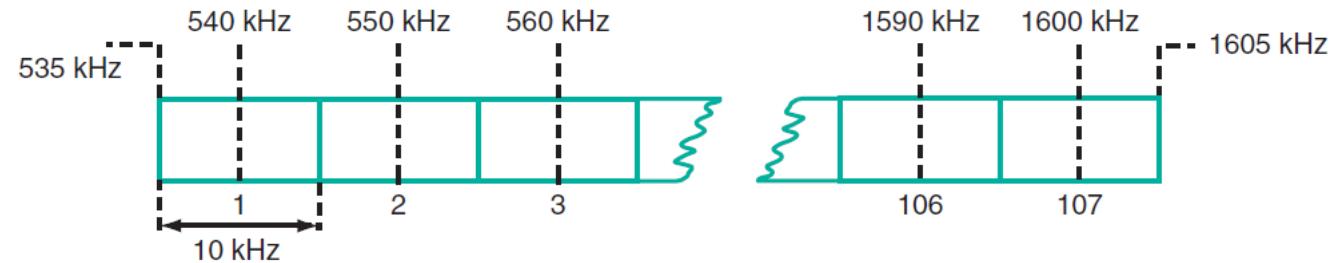
$$f_{\text{LSB}} = 980 - 5 = 975 \text{ kHz}$$

$$\text{BW} = f_{\text{USB}} - f_{\text{LSB}} = 985 - 975 = 10 \text{ kHz}$$

$$\text{BW} = 2(5 \text{ kHz}) = 10 \text{ kHz}$$

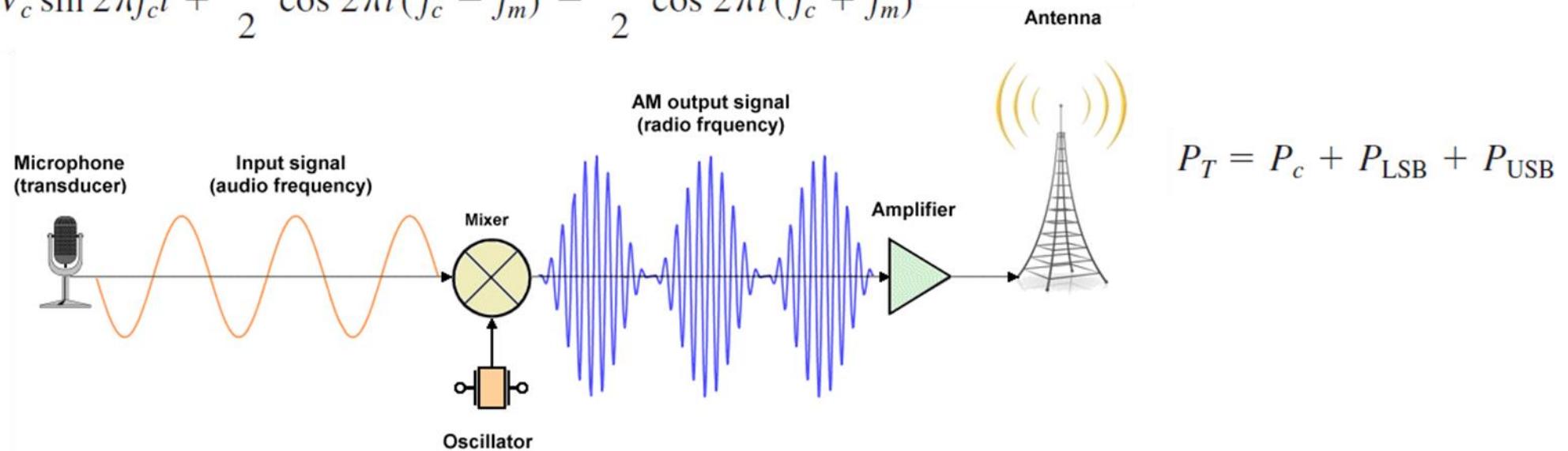


- Not:** AM yayın yapan radyo istasyonları 10 KHz aralılar ile 540-1600 KHz bandına sıralanmıştır.



- AM radyo yayınında genlik modülasyonlu sinyal güç kuvvetlendirici üzerinden karakteristik empedansı saf direnç olarak kabul edilen antene beslenir. Genlik modülasyonlu sinyali oluşturan taşıyıcı ve yan bant bileşenleri anten üzerinde güç üretirler. Antenden yayılan toplam güç, tüm bileşenlerin güçleri toplamına eşittir.

$$v_{AM} = V_c \sin 2\pi f_c t + \frac{V_m}{2} \cos 2\pi t(f_c - f_m) - \frac{V_m}{2} \cos 2\pi t(f_c + f_m)$$



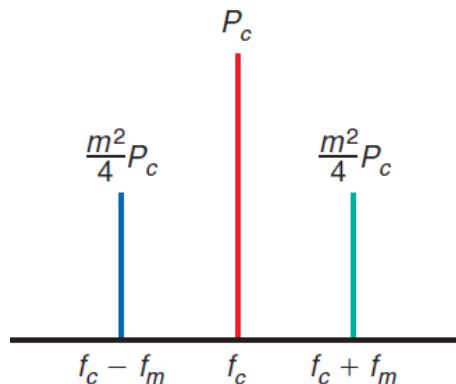
- Genlik modülasyonlu sinyal ifadesinde taşıyıcı ve mesaj sinyallerinin genlik tepe değerleri olduğuna göre bu değerlerin $\sqrt{2}$ ile bölünmesiyle bulunan RMS değerleri yardımıyla güç ifadesi elde edilebilir.

$$v_{AM} = \frac{V_c}{\sqrt{2}} \sin 2\pi f_c t + \frac{V_m}{2\sqrt{2}} \cos 2\pi t(f_c - f_m) - \frac{V_m}{2\sqrt{2}} \cos 2\pi t(f_c + f_m)$$

$$P = V^2/R \quad \Rightarrow \quad P_T = \frac{(V_c/\sqrt{2})^2}{R} + \frac{(V_m/2\sqrt{2})^2}{R} + \frac{(V_m/2\sqrt{2})^2}{R} = \frac{V_c^2}{2R} + \frac{V_m^2}{8R} + \frac{V_m^2}{8R}$$

- Elde edilen güç ifadesi modülasyon indisini kullanılarak taşıyıcı sinyalin genlik tepe değerine göre yeniden düzenlenebilir:

$$P_T = \frac{V_c^2}{2R} \left(1 + \frac{m^2}{4} + \frac{m^2}{4} \right) = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2} \right)$$



- Modülasyon indisi $m = 1$ olan bir sistemde her bir yan bandın gücü, taşıyıcı gücünün dörtte biridir. Taşıyıcı gücü 100 Watt ise yan bantların gücü $25 + 25 = 50$ Watt olur. Toplam gücün % 66,67 'si taşıyıcıda, % 33,33 'ü ise yan bantlar üzerinde bulunur.
- Modülasyonlu sinyalde taşıyıcı kendi başına hiçbir bilgi taşımaz. Modülasyon yapılmadan da taşıyıcı sinyal vericiden gönderilip, alıcıdan alınabilir. Fakat bu şekilde bilgi iki nokta arasında taşınmaz. Genlik modülasyonlu sinyal içinde sadece yan bantlar bilgi içerir. Bu durumda toplam gücün 2/3'ü taşıyıcı sinyal üzerinde boş harcanır.
- Modülasyon indisi azaldıkça yan bantların gücü daha da düşer. Modülasyon indisi $m = 0.5$ olan bir sistemde her bir yan bant gücünün, taşıyıcı gücüne oranı $1/16$ 'dır. Taşıyıcı gücü 100 Watt ise yan bantların gücü $6.25 + 6.25 = 12.50$ Watt olur. Buna göre toplam gücün % 88,88 'si taşıyıcıda, geriye kalan % 11,11 'i ise yan bantlar üzerinde bulunur.

- Genlik modülasyonunda çıkış geriliminin ölçülmesi zor olduğundan güç hesabında akımdan faydalanan kolaylık sağlar. Anten empedansı bilindiğinde modüle edilmemiş taşıyıcı sinyalin akım değeri ampermetre ile ölçülerek çıkış gücü hesaplanabilir:

$$I_T = I_c \sqrt{1 + m^2/2} \quad \Rightarrow \quad P_T = I_T^2 R$$

- Ayrıca modüle edilmemiş taşıyıcı sinyal akım değeri ve modüle edilmiş sinyal akım değeri birlikte ölçülürse, modülasyon indisi hesaplanabilir.

$$m = \sqrt{2 \left[\left(\frac{I_T}{I_c} \right)^2 - 1 \right]}$$

Uygulama 4

- Taşıyıcı gücü 30 Watt olan bir AM radyo vericisi için modülasyon yüzdesi % 85 olarak veriliyor. Toplam gücü ve tek bir yan bantta gücü hesaplayın?

$$P_T = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) = 30 \left[1 + \frac{(0.85)^2}{2} \right] = 30 \left(1 + \frac{0.7225}{2} \right)$$

$$P_T = 30(1.36125) = 40.8 \text{ W}$$

$$P_{\text{SB}} \text{ (both)} = P_T - P_c = 40.8 - 30 = 10.8 \text{ W}$$

$$P_{\text{SB}} \text{ (one)} = \frac{P_{\text{SB}}}{2} = \frac{10.8}{2} = 5.4 \text{ W}$$

Uygulama 5

- Modülasyon yüzdesi % 85 olan genlik modülasyonlu sistemde modüle edilmemiş taşıyıcı sinyalin 50Ω empedansına sahip antene beslendiği AM verici için taşıyıcı sinyalin akım değeri 10 Amper olarak ölçülüyor. Toplam gücü hesaplayın?

$$I_T = I_c \sqrt{(1 + m^2/2)} \quad \longrightarrow \quad I_T = 10 \sqrt{\left(1 + \frac{0.85^2}{2}\right)} = 10 \sqrt{1.36125} = 11.67 \text{ A}$$

$$P_T = I_T^2 R \quad \longrightarrow \quad P_T = 11.67^2 (50) = 136.2(50) = 6809 \text{ W}$$

Uygulama 6

- Genlik modülasyonlu sistemde modüle edilmemiş taşıyıcı sinyalin akım değeri 2.2 A ve antende modüle edilmiş sinyal akım değeri ise 2.6 A olarak ölçülüyor. Modülasyon indisini bulun?

$$m = \sqrt{2 \left[\left(\frac{I_T}{I_c} \right)^2 - 1 \right]} = \sqrt{2 \left[\left(\frac{2.6}{2.2} \right)^2 - 1 \right]} = \sqrt{2[(1.18)^2 - 1]} = \sqrt{0.7934} = 0.89$$

Uygulama 7

- Genlik modülasyonlu vericide modüle edilmemiş AM sinyali akım değeri 4.8 Amper olarak ölçülüyor. Modülasyon indisi 0.9 ve anten empedansı 40Ω olduğuna göre;

a) Taşıyıcı gücünü hesaplayın?

$$P_c = I^2 R = (4.8)^2 (40) = (23.04)(40) = 921.6 \text{ W}$$

b) Toplam gücü hesaplayın?

$$I_T = I_c \sqrt{1 + \frac{m^2}{2}} = 4.8 \sqrt{1 + \frac{(0.9)^2}{2}} = 4.8 \sqrt{1 + \frac{0.81}{2}}$$

c) Toplam yan bant gücü hesaplayın?

$$I_T = 4.8 \sqrt{1.405} = 5.7 \text{ A}$$

d) Tek yan bant gücünü hesaplayın?

$$P_T = I_T^2 R = (5.7)^2 (40) = 32.49(40) = 1295 \text{ W}$$

$$P_{SB} = P_T - P_c = 1295 - 921.6 = 373.4 \text{ W}$$

$$186.7 \text{ W} + 186.7 \text{ W} = 373.4 \text{ W}$$

$$P_{SB} = m^2 \frac{P_c}{4} = \frac{(0.9)^2(921.6)}{4} = \frac{746.5}{4} = 186.6 \text{ W}$$

Uygulama 8

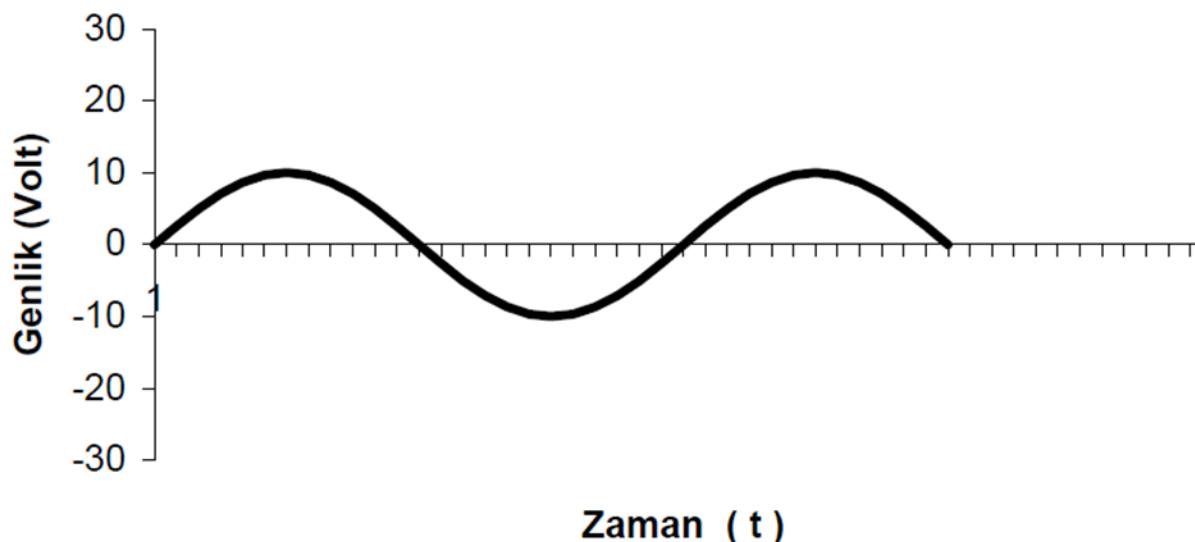
- Genlik modülasyonlu radyo vericisinde taşıyıcı sinyal akım değeri 4.8 A ve modüle edilmiş sinyal akım değeri 5.1 A olarak ölçülüyor. Modülasyon yüzdesi nedir?

$$\begin{aligned}m &= \sqrt{2 \left[\left(\frac{I_T}{I_c} \right)^2 - 1 \right]} \\&= \sqrt{2 \left[\left(\frac{5.1}{4.8} \right)^2 - 1 \right]} \\&= \sqrt{2[(1.0625)^2 - 1]} \\&= \sqrt{2(1.13 - 1)} \\&= \sqrt{2(0.13)} \\&= \sqrt{0.26} \\m &= 0.51\end{aligned}$$

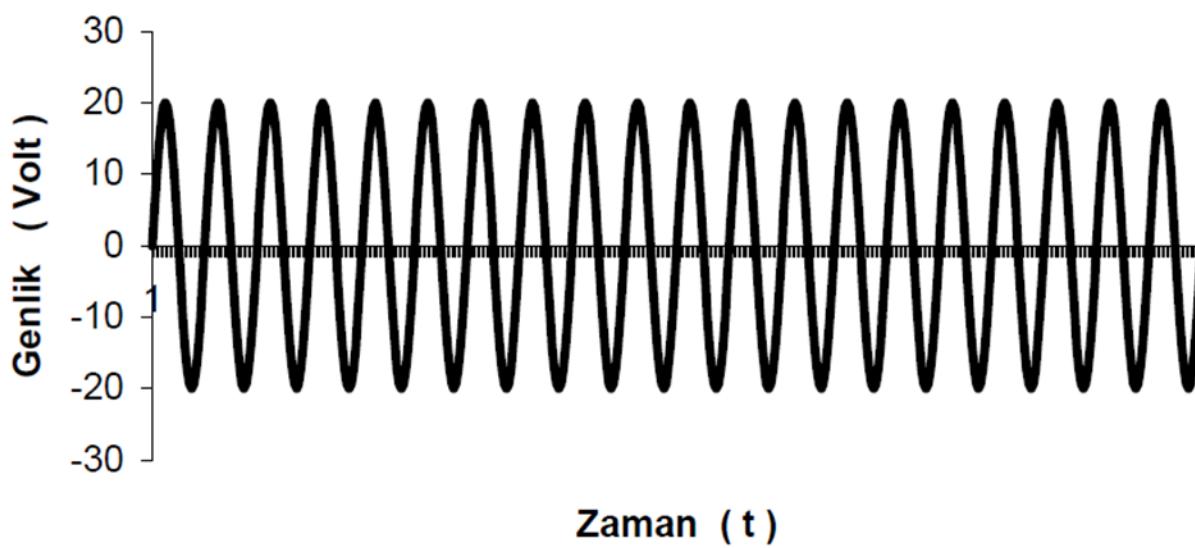
- Bir ses sinyalinin matematiksel ifadesi $10\sin(2\pi 3200t)$ olarak verilmiştir. Bu bilgi sinyali matematiksel ifadesi $20\sin(2\pi 300000t)$ olan bir taşıyıcı sinyali modüle etmekte kullanılmaktadır.
 $f=300000 \text{ Hz}=300 \text{ KHz}$
- a) Ses sinyalini çiziniz.
- b) Taşıyıcı sinyalini çiziniz.
- c) AM sinyali ölçekli çiziniz.
- d) Modülasyon indisini ve modülasyon yüzdesini bulunuz.
- e) Frekans spektrumunda oluşacak frekans ve genlikleri çiziniz.
- f) AM sinyalinin matematiksel ifadesini yazınız.
- g) AM sinyalinin frekans spektrumunda işgal ettiği bant genişliği nedir.
- h) AM sinyali empedansı 50Ω olan bir anten ile ışına yaptırılırsa harcanan taşıyıcı gücü, yan bant gücü ve toplam güç ne olur.

C ö z ü m

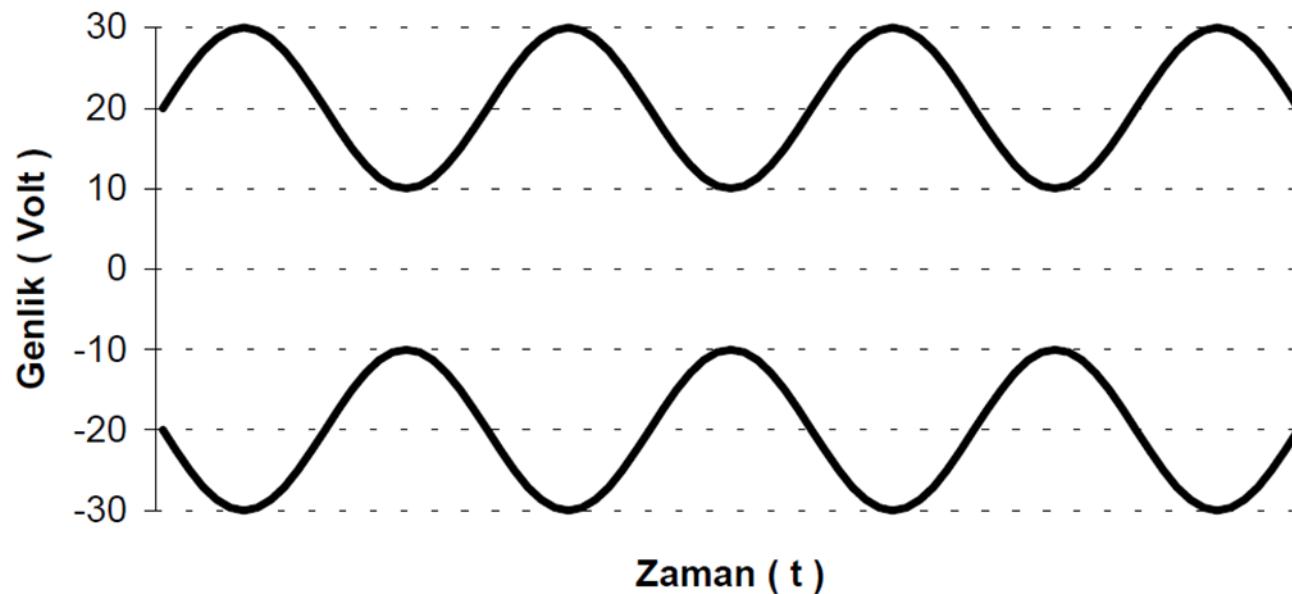
$$V_m = V_m \sin 2\pi f_m t$$



$$V_c = V_c \sin 2\pi f_c t$$



C ö z ü m



Modülasyon indisi (m)

$$m = \frac{V_m}{V_c} = \frac{10}{20} = 0,5$$

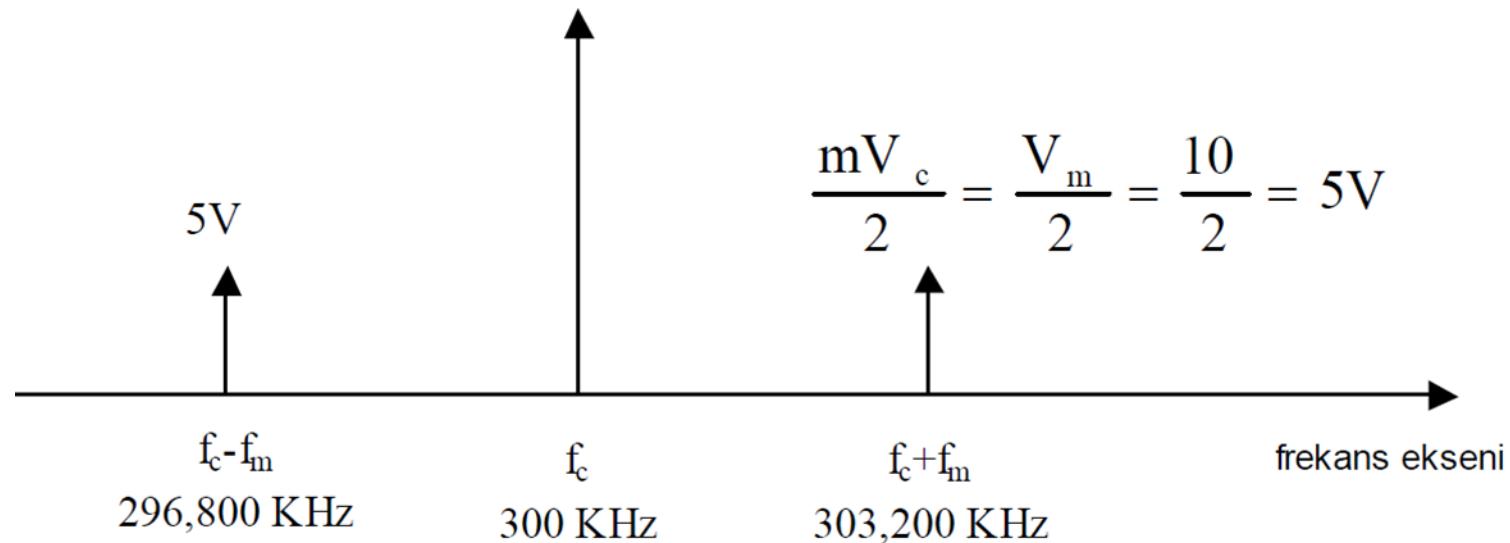
m=0,5

Modülasyon yüzdesi (M) M=m*%100

M=%50

C ö z ü m

$$V_c=20 \text{ V}$$



$$V = (V_c + V_m \sin 2\pi f_m t) \sin 2\pi f_c t \quad (\text{Modüleli işaret})$$

$$v = V_c \sin 2\pi f_c t + \frac{V_m}{2} \cos 2\pi(f_c - f_m) - \frac{V_m}{2} \cos 2\pi(f_c + f_m)$$

$$v = 20 \sin 2\pi 300000t + 5 \cos 2\pi 296800t - 5 \cos 2\pi 303200t$$

$$BW = 2fm = 2 * 3200 = 6400 \text{ Hz}$$

$$P_{\text{toplam}} = P_{\text{taşıyıcı}} + P_{\text{üstyanbant}} + P_{\text{altyanbant}}$$

$$P_c = \frac{V_{eff}^2}{R} = \frac{V_c^2}{2R} = \frac{400}{100} = 4 \text{ W}$$

$$P_{\text{üstyanbant}} = P_{\text{altyanbant}} = \frac{m^2 P_c}{4} = \frac{0,5^2 * 4}{4} = 0,25 \text{ W}$$

$$P_{\text{toplam}} = 4 \text{ W} + 0,25 \text{ W} + 0,25 \text{ W} = 4,5 \text{ W}$$

Genlik Modülasyonu

- Güç tüketimi ve bant genişliği bakımından verimli olmamasına karşın, genlik modülasyonu basit olması sebebiyle halen kullanılmaktadır. Uygulama alanlarına örnek olarak radyo ve televizyon yayıcılığı, uçak-kule haberleşmesi verilebilir. Genlik modülasyonu aynı zamanda faz modülasyonu ile birleştirilerek QAM (quadrature amplitude modulation) elde edilir ve modemler, kablolu televizyon, kablosuz haberleşme gibi uygulamalarda yüksek hızda veri transferi sağlar.

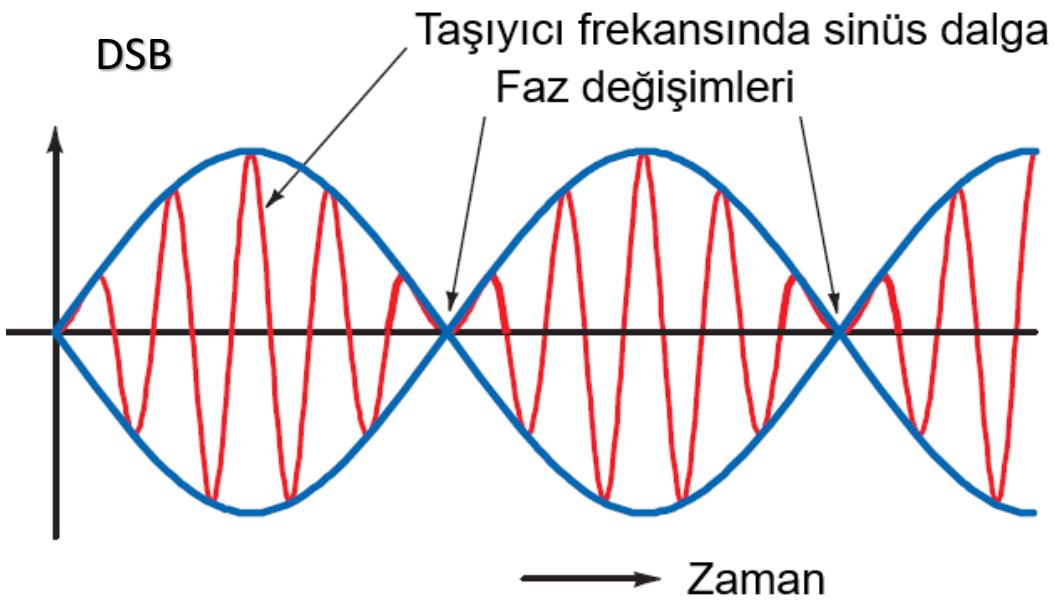
- Ses ve video sinyalleri geniş bir genlik ve frekans aralığında değişir. Modülasyon indisinin 1 olduğu durum sadece mesaj sinyalinin tepe değerlerinde meydana gelir. Bu sebepten anlamlı bilgi içeren ortalama yan bant gücü ideal durumdaki %33,33 değerinden oldukça düşüktür. Yan bant gücü düştüğünde alıcıya ulaşan sinyaller zayıflar ve haberleşme güvenilirliği azalır.
- Genlik modülasyonunda güç verimliliğini maksimum yapmanın yolu taşıyıcı ve yan bantlardan birisini ortadan kaldırmaktır. Bu durumda **tek yan bant** (single sideband, SSB) biçimde sinyal ortaya çıkar. Tek yan bant sinyal üretmek için ilk aşamada taşıyıcı sinyal bastırılır ve yan bantlardan oluşan **taşıyıcısı bastırılmış çift yan bant** (double sideband, suppressed carrier, DSB-SC) biçiminde sinyal elde edilir. Böylece taşıyıcı için güç israf edilmez.

- AM gerçekleştirildiğinde taşıyıcı, alt yan bant ve üst yan bant olmak üzere üç bileşen ortaya çıkar. Fakat orijinal mesaj sinyalinin alıcıda elde edilmesi için bunların tamamının verici tarafından gönderilmesi gerekmekz.
 - DSB-SC sinyali, genlik modülasyonun taşıyıcı sinyal içermeyen özel durumudur. Mesaj sinyali ile taşıyıcı sinyalin çarpılması sonucunda, iki sinüzoidal yan bant sinyalinin toplamı şeklinde elde edilir.

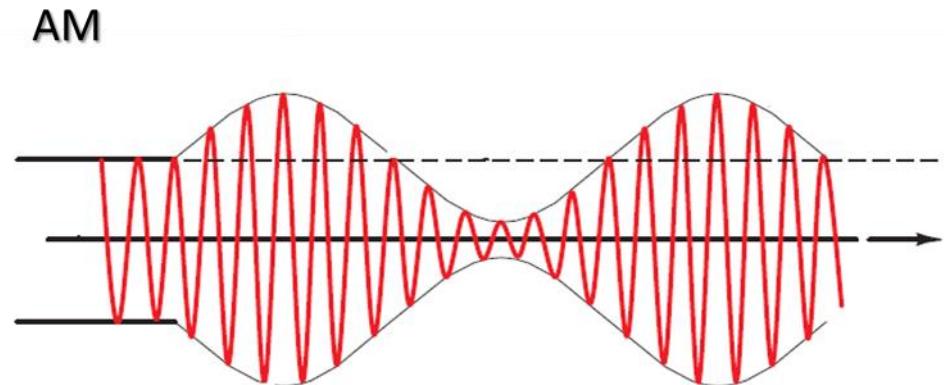
$$v_{\text{DSB-SC}}(t) = \boxed{V_c \sin 2\pi f_c t} \boxed{V_m \sin 2\pi f_m t} = \frac{V_c V_m}{2} \cos[2\pi(f_c - f_m)t] + \frac{V_c V_m}{2} \cos[2\pi(f_c + f_m)t]$$

DSB - SC Modülasyonu

- Dikkat edilirse çift yan bant genlik modülasyonu dalga şekli, klasik taşıyıcılı AM sinyali ile aynı değildir. Sinyal dalga formunda genlik değerinin sıfır geçişlerinde faz değişimleri görülür.



Geleneksel AM sinyali

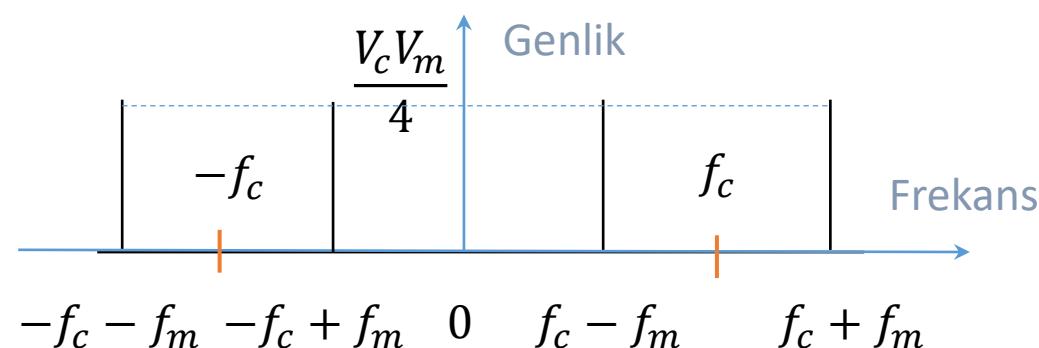


- Taşıyıcısı bastırılmış çift yan bant modülasyonu sinyali frekans domeninde analiz edilirse, taşıyıcı frekansının her iki yanında alt yan bant ve üst yan bant bileşenleri görülür.

$$\cos(2\pi f_c t) = \frac{1}{2} [\exp(j2\pi f_c t) + \exp(-j2\pi f_c t)]$$

$$\exp(j2\pi f_c t) \iff \delta(f - f_c)$$

$$v_{\text{DSB-SC}}(f) = \frac{V_c V_m}{4} [\delta(f - f_c + f_m) + \delta(f + f_c - f_m)] + \frac{V_c V_m}{4} [\delta(f - f_c - f_m) + \delta(f + f_c + f_m)]$$

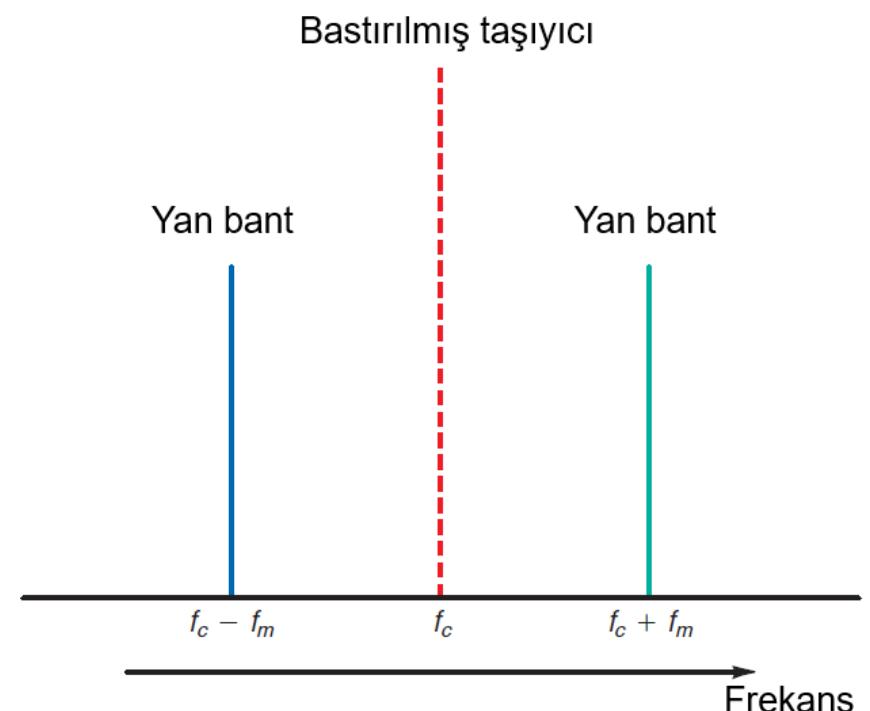
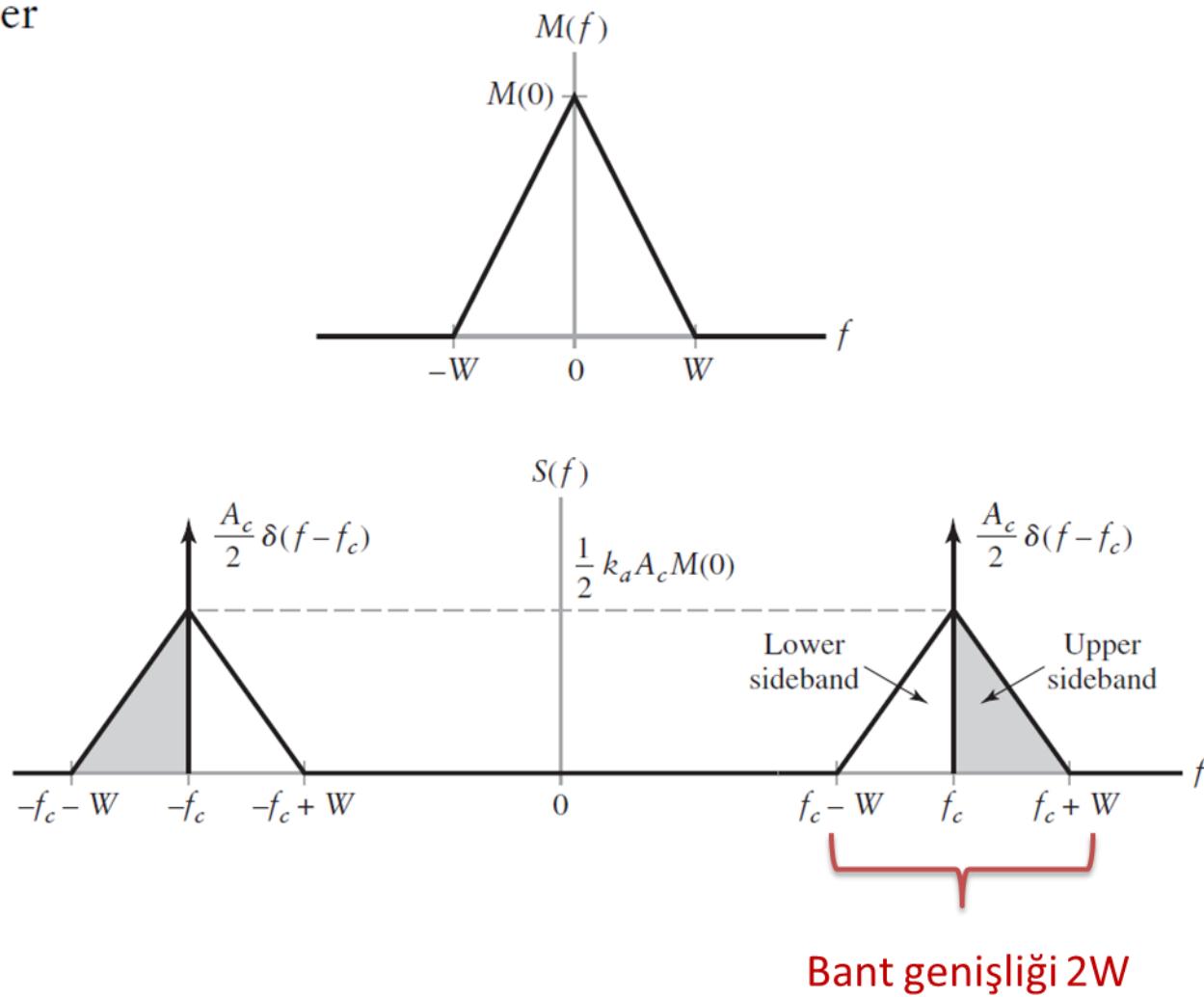


DSB - SC Modülasyonu

$$m(t) \iff M(f)$$

$$m(t) \exp(j2\pi f_c t) \iff M(f - f_c)$$

Fourier



Bant genişliği $2W$

- Taşıyıcı bastırıldığında önemli ölçüde güç tasarrufu sağlansa da, bu durumda sinyali alıcı tarafında demodüle etmek zordur. Bundan dolayı DSB-SC modülasyonu çok fazla uygulamada kullanılmaz. Az da olsa bazı özel uygulamalarda kullanımı vardır. Örneğin TV sinyalinde renk bilgisi DSB-SC modülasyonu ile gönderilir.
- DSB-SC modülasyonunda taşıyıcı bastırılır ve yan bantlar üzerinden bilgi gönderilir. Fakat bilginin alıcıya ulaşması için yan bantların her ikisinin de gönderilmesine ihtiyaç yoktur. Taşıyıcı ile birlikte yan bantlardan biri bastırılarak tek yan bant (SSB) genlik modülasyonu sinyali elde edilir.
- SSB tercih edildiğinde bilgi taşıyan mesaj sinyali yoksa hiçbir RF sinyal gönderilmez. Buna karşın AM sinyalinde bilgi olsa da olmasa da (yani modülasyon yapılsa da, yapılmasa da) taşıyıcı sinyal gönderilir.

- DSB-SC modülasyon çıkışında elde edilen sinyali oluşturan yan bantlardan, alt yan bant bastırılıp üst yan bant sinyali kullanılarak SSB sinyali elde edilir:

$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) \quad c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$$

$$\begin{aligned} S_{\text{DSB}}(t) &= c(t)m(t) \\ &= A_c A_m \cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_m t) \\ &= \frac{1}{2} A_c A_m \cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \frac{1}{2} A_c A_m \cos[2\pi(f_c - f_m)t] \end{aligned}$$

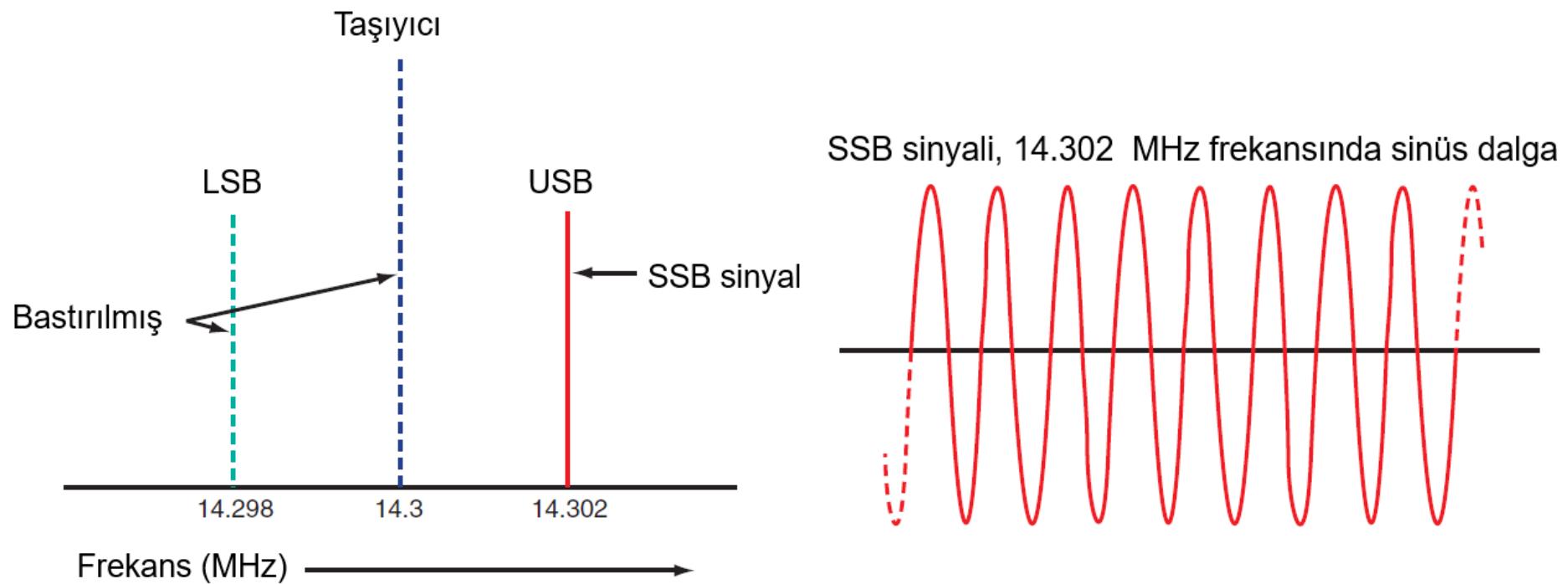
$$S_{\text{USSB}}(t) = \frac{1}{2} A_c A_m \cos[2\pi(f_c + f_m)t]$$

$$S_{\text{USSB}}(t) = \frac{1}{2} A_c A_m \cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_m t) - \frac{1}{2} A_c A_m \sin(2\pi f_c t) \sin(2\pi f_m t)$$

- AM sinyali farklı frekanslarda üç bileşenden meydana geldiğinden sönümlenmeden etkilenmesi olasılığı yüksektir. Taşıyıcı ve yan bant sinyalleri alıcıya farklı zamanlarda ulaştıklarından faz kayması sebebiyle birbirlerini yok ederler. Buna karşın SSB sinyali tek bir frekans bileşenine sahip olduğundan dolayı kablosuz kanal üzerinde seçici sönümlenmeden daha az etkilenir.
- SSB sinyali frekans alanında AM ve DSB-SC sinyallerinin yarısı kadar bant genişliğine sahiptir. Bu sebepten aynı spektrum içinde daha fazla sayıda sinyal gönderilir. Taşıyıcı ve diğer yan bant üzerinde harcanan güç, tek yan bant üzerinde harcanacağından SSB modülasyonu ile daha güçlü sinyal sağlayarak uzak mesafelere bilgi iletimi gerçekleştirilebilir.

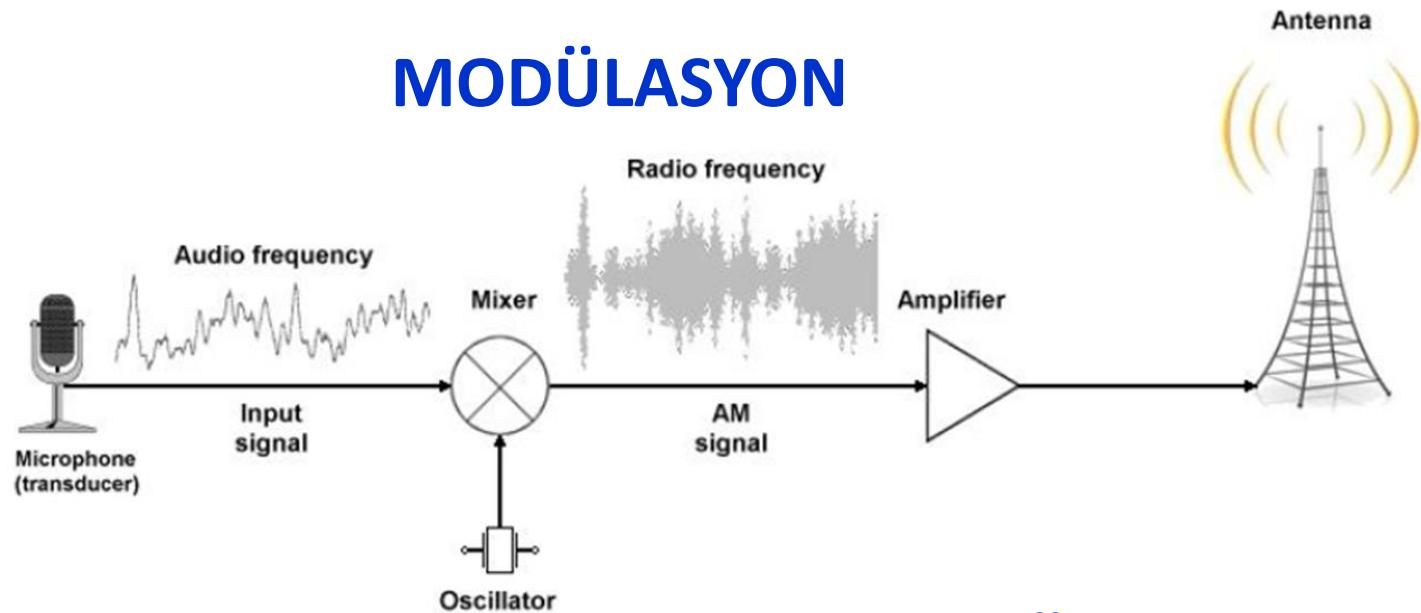
SSB Modülasyonu

- 2 KHz frekansında mesaj sinyali ile module edilmiş 14,3 MHz frekansında taşıyıcı sinyalle elde edilen SSB genlik modülasyonu sinyali zaman ve frekans alanında aşağıda gösterilmiştir.



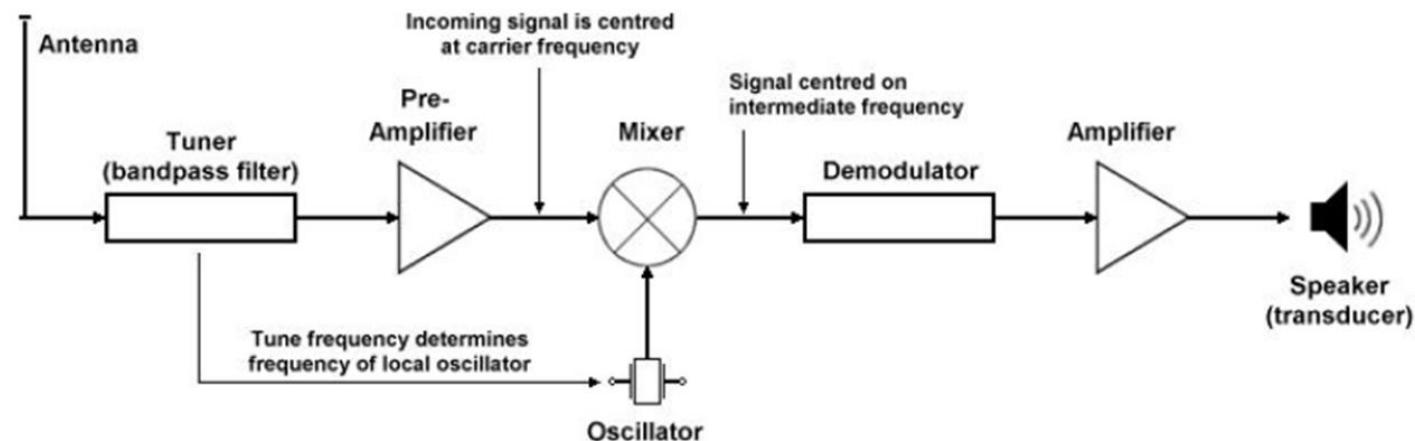
VERİCI

MODÜLASYON



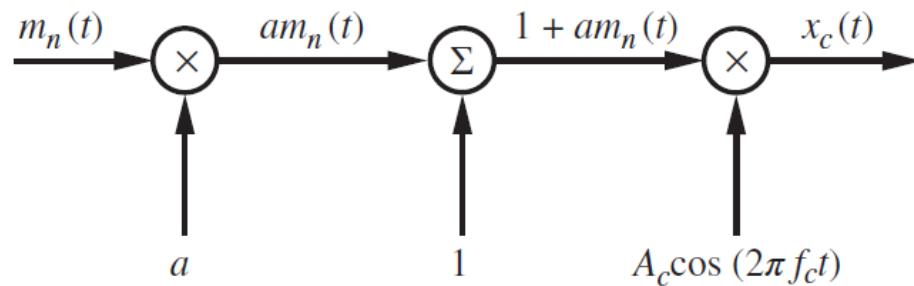
ALICI

DEMODYÜLASYON

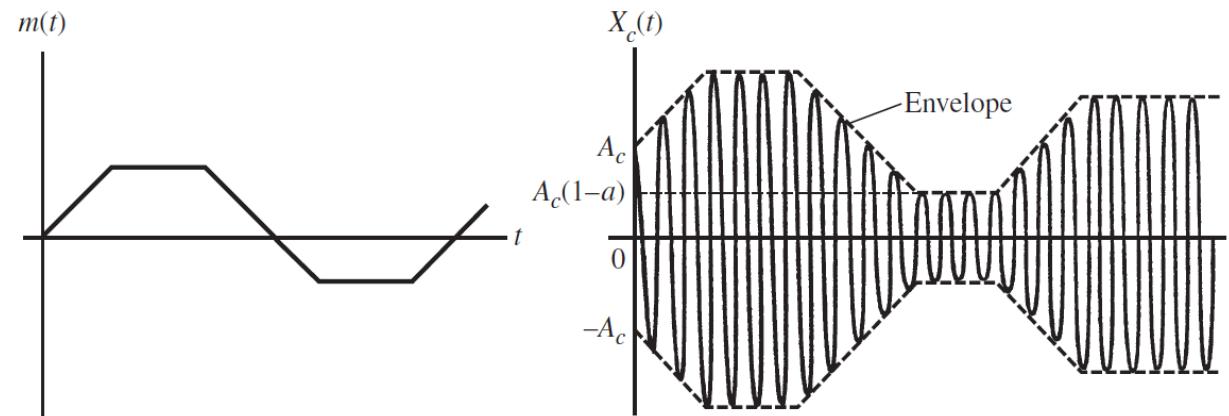


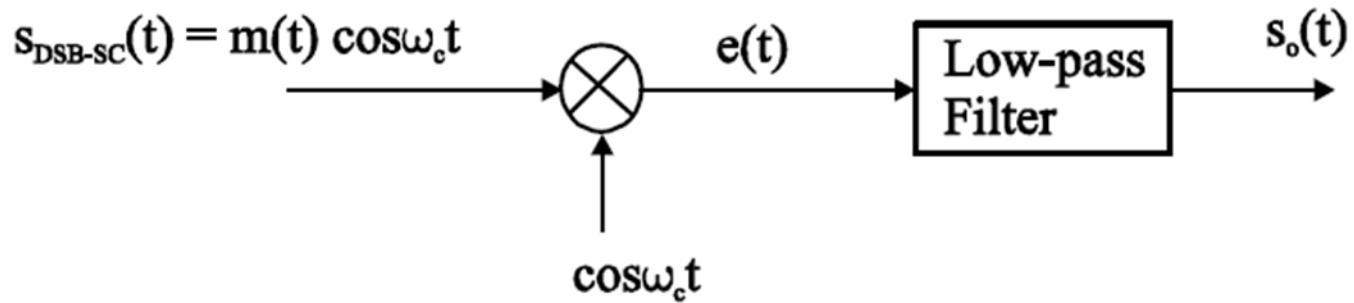
AM Demodülasyon

- AM sinyali için demodülasyon oldukça kolaydır ve zarf algılama olarak bilinen basit yöntem kullanılır. Alıcıya ulaşan AM sinyali tekrar taşıyıcı sinyal ile çarpılır ve alçak geçiren filtreden geçirilir.



$$x_c(t) = A_c[1 + am_n(t)] \cos(2\pi f_c t)$$





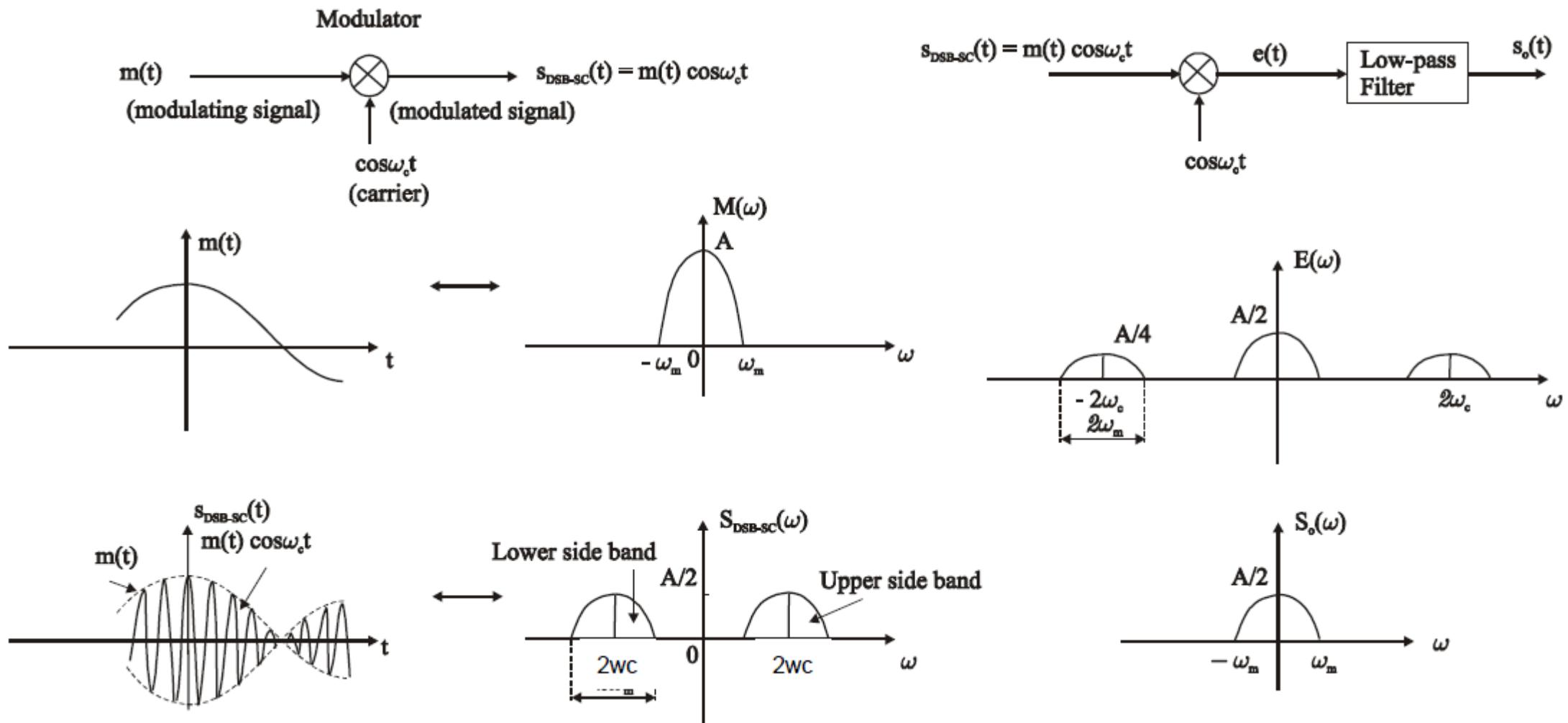
$$e(t) = m(t) \cos^2 \omega_c t = (1/2)[m(t) + m(t) \cos 2\omega_c t]$$

$$E(\omega) = (1/2)M(\omega) + (1/4)[M(\omega + 2\omega_c) + M(\omega - 2\omega_c)]$$

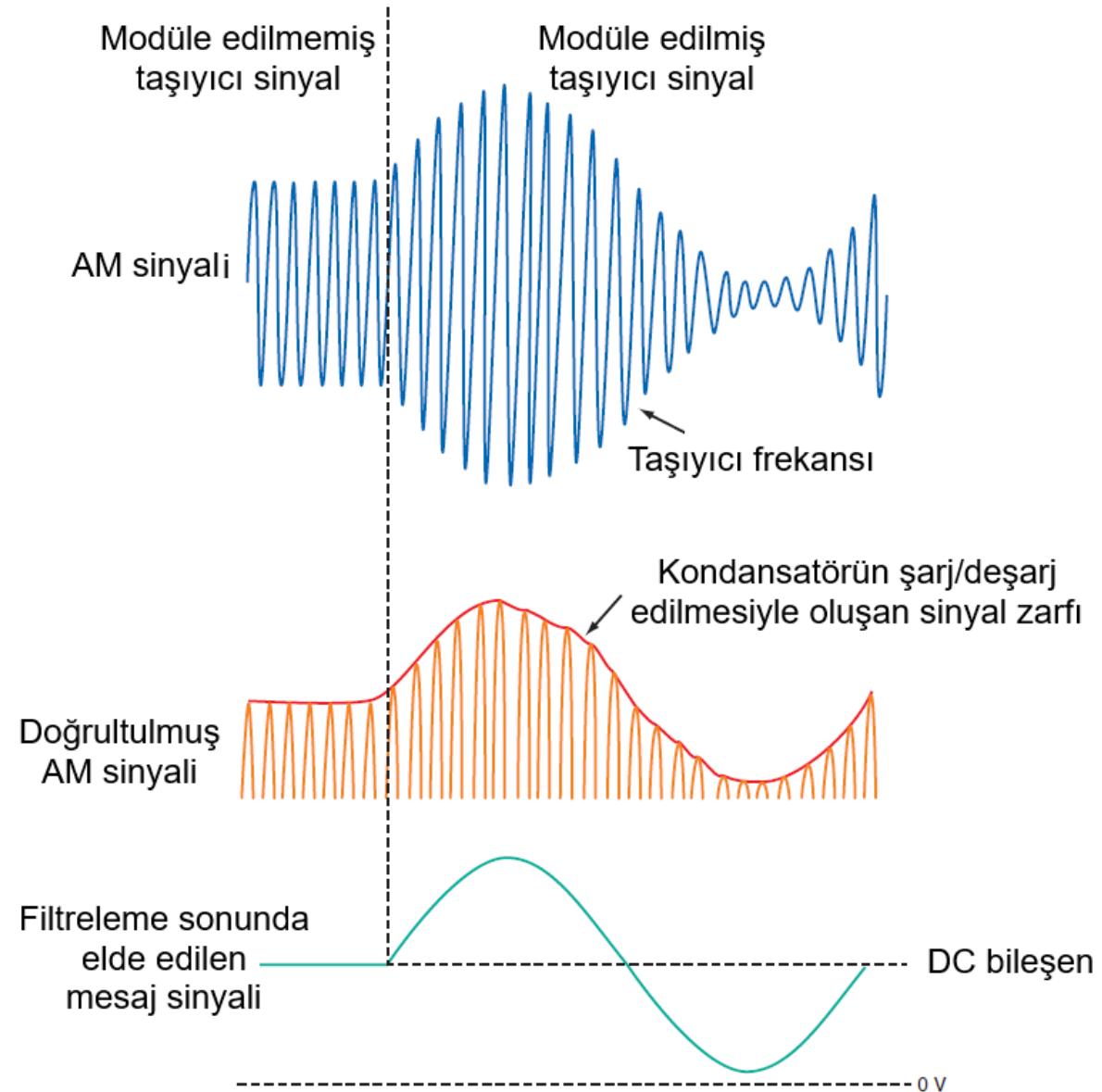
A.G.F. \longrightarrow

$$S_o(\omega) = (1/2)M(\omega)$$
$$s_o(t) = (1/2)m(t)$$

AM Demodülasyon



AM Demodülasyon



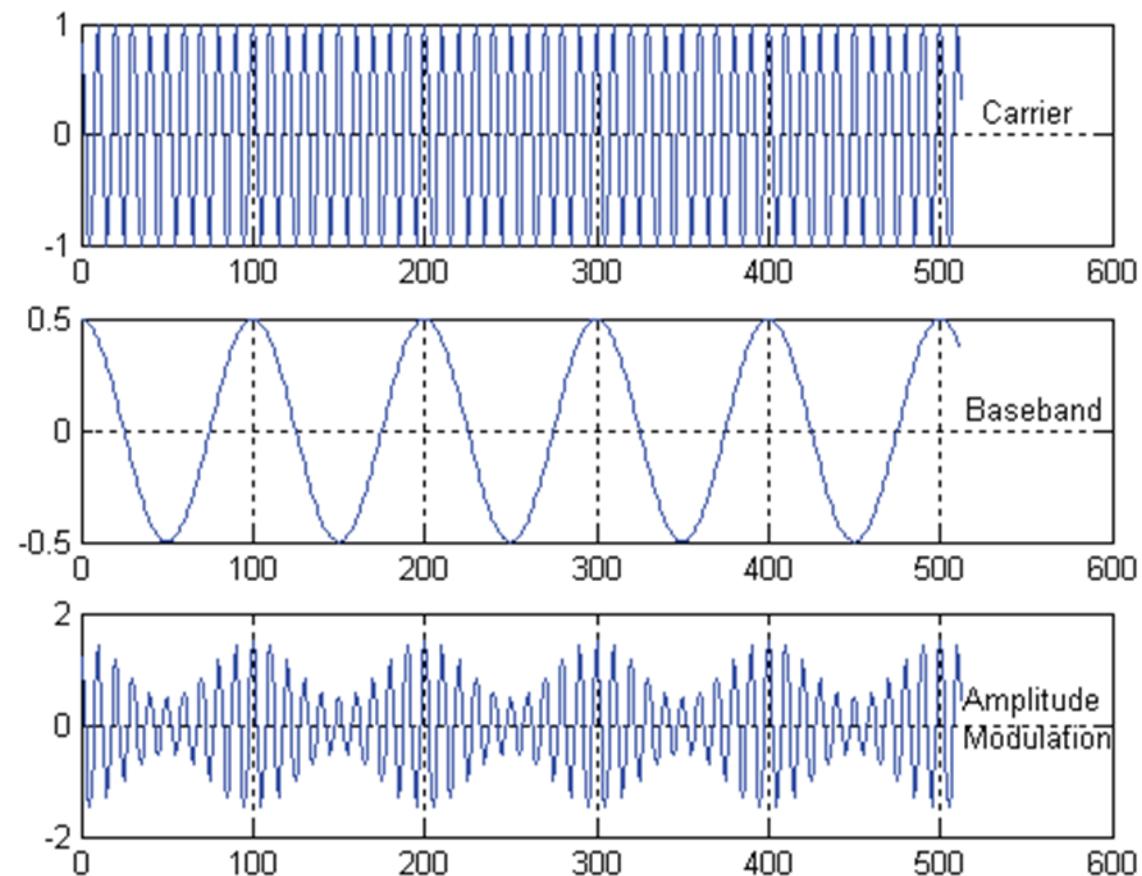
- Demodülasyon işlemi taşıyıcıya bağlıdır. Eğer taşıyıcı yoksa alıcıda yeniden üretilir ve alınan sinyal içerisinde eklenir. Bu sebepten DSB ve SSB genlik modülasyonlarının en büyük dezavantajı alıcıda demodüle edilmelerinin zor olmasıdır.
- Alıcıda elde edilen mesaj sinyalinin, vericiden gönderilen mesaj sinyaliyle uyuşması için, yeniden oluşturulan taşıyıcı sinyalin orijinaliyle aynı frekans ve fazda alınan sinyale eklenmesi gereklidir. Bu işlemi pratikte gerçekleştirmek oldukça zordur.

- SSB genlik modülasyonu ses iletimi için kullanıldığında alıcıda oluşturulan taşıyıcı sinyalin frekansı değiştirilebilir şekilde yapılabilir. Böylece mesaj sinyali elde edilecek şekilde elle ayar yapılması sağlanır. Fakat bu imkan veri iletiminde yoktur.
- SSB ve DSB uygulandığında demodülasyon problemini çözmek için yan bant(lar) yanında **pilot taşıyıcı** adı verilen düşük güç seviyesinde taşıyıcı sinyal ilettilir. Pilot taşıyıcı sinyal alıcıda kuvvetlendirilip tekrar alınan sinyale eklenir. TV renk bilgisi iletiminde ve FM stereo yayınında bu teknik kullanılır.

MATLAB UYGULAMASI

AM MODÜLASYON

$$V_m = V_m \cos \omega_m t \quad V_c = V_c \cos \omega_c t \quad V = V_c [1 + m_a \cos \omega_m t] \cos \omega_c t$$



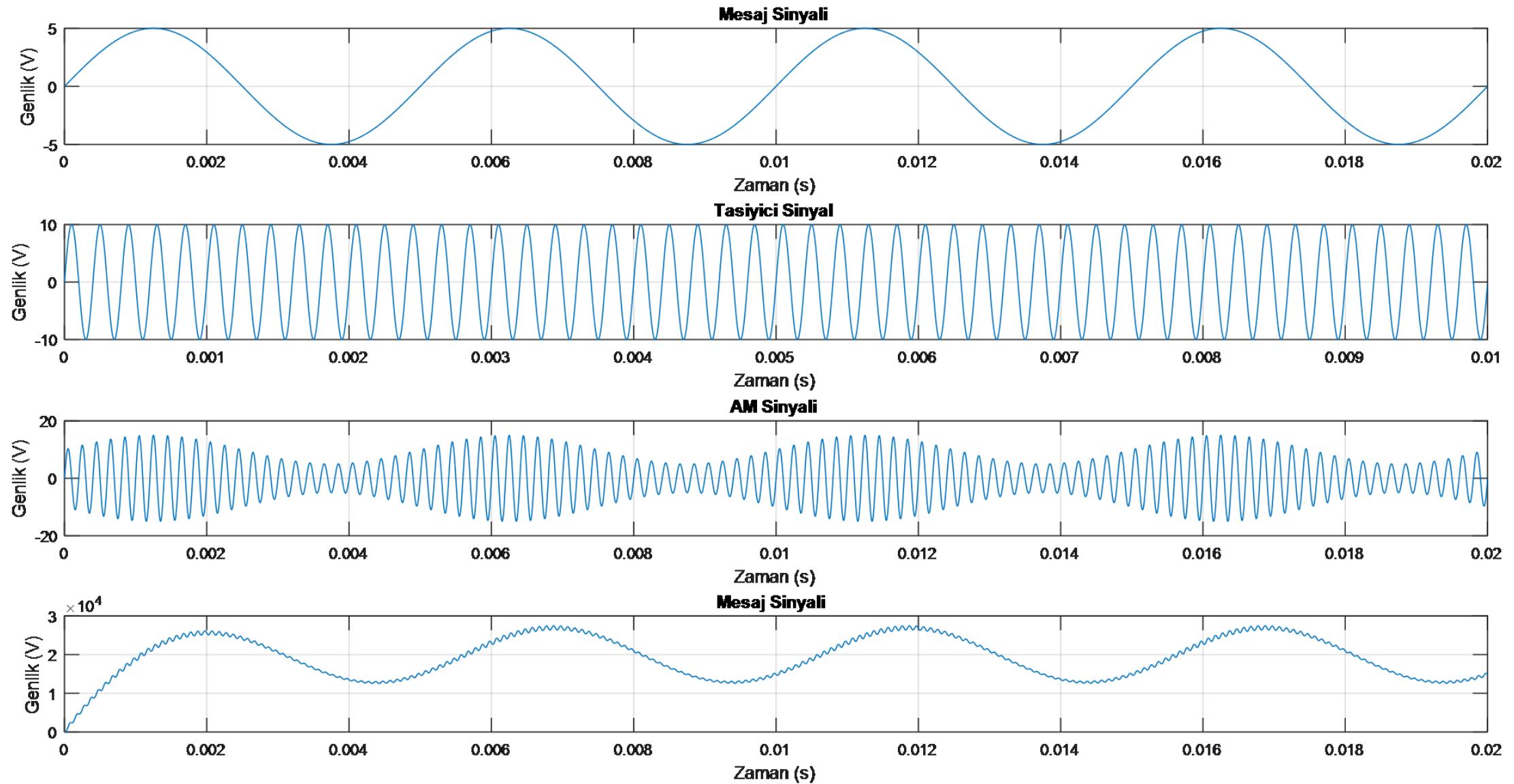
AM MODÜLASYON

```
clc % ekranı temizle
clear all % tanımlı değişkenleri temizle
close all % açık dosyaları kapat
t=linspace(0,0.02,10000); % sinyal zaman aralığı tanımı
fc=5000; % taşıyıcı sinyal frekansı
fm=200; % mesaj sinyali frekansı
fs=40000; % örneklemme frekansı
Am=5; % mesaj sinyali genliği
Ac=10; % taşıyıcı sinyal genliği
m=Am/Ac; % AM modülasyon indis
wc=2*pi*fc*t; % taşıyıcı sinyal açısal frekans (rad)
wm=2*pi*fm*t; % mesaj sinyali açısal frekans (rad)
ec=Ac*sin(wc); % taşıyıcı sinyal
em=Am*sin(wm); % mesaj sinyali
y=Ac*(1+m*sin(wm)).*sin(wc); % AM sinyali
```

AM DEMODÜLASYON

```
z=y.*ec;
% Demodülasyon için AM sinyalinin taşıyıcı sinyal ile çarpılması
z1=conv(z,exp(-t/0.000795));
% Demodülasyonlu sinyalin alçak geçiren filtreden geçirilmesi
% AGF zaman sabiti exp(-t/RC),
% Kesim frekansı fm=200 fm=1/(2*pi*R*C)
% R=1 Kohm ve C=0.795 mikroFarad ise RC=0.000795
l=10000;
subplot(4,1,1), plot(t(1:l),em(1:l))
xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik (V)'); title('Mesaj Sinyali');
subplot(4,1,2),plot(t(1:l/2),ec(1:l/2))
xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik (V)'); title('Tasiyici Sinyal');
subplot(4,1,3),plot(t(1:l),y(1:l))
xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik (V)'); title('AM Sinyali');
subplot(4,1,4),plot(t(1:l),z1(1:l))
xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik (V)'); title('Mesaj Sinyali '');
```

AM



COMMUNICATION TOOLBOX

```
>> help ammod
ammod - Amplitude modulation
```

This MATLAB function uses the message signal x to modulate a carrier signal with frequency F_c (Hz) using amplitude modulation.

```
y = ammod(x, Fc, Fs)
y = ammod(x, Fc, Fs, ini_phase)
y = ammod(x, Fc, Fs, ini_phase, carramp)
```

```
>> help amdemod
amdemod - Amplitude demodulation
```

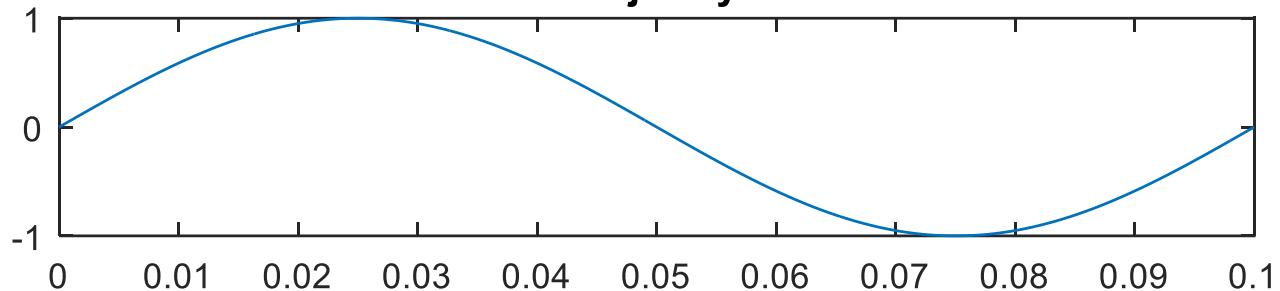
This MATLAB function demodulates the amplitude modulated signal y from a carrier signal with frequency F_c (Hz).

```
z = amdemod(y, Fc, Fs)
z = amdemod(y, Fc, Fs, ini_phase)
z = amdemod(y, Fc, Fs, ini_phase, carramp)
z = amdemod(y, Fc, Fs, ini_phase, carramp, num, den)
```

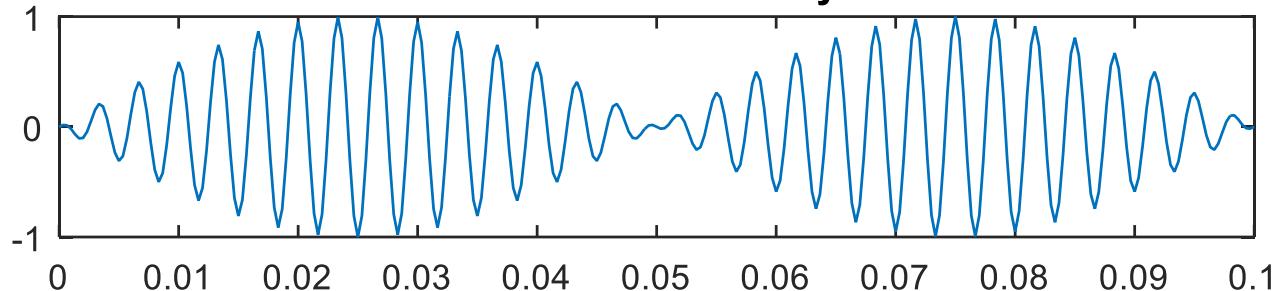
```
fs=3000; % Örnekleme hızı 3000 örnek/saniye
fc=300; % Taşıyıcı frekansı
t=[0:0.1*fs]'/fs; % Örnekleme
x=sin(2*pi*t*10); % Sinyalin gösterimi
plot(t,x);
subplot(3,1,1);
plot(t,x);
y=ammod(x,fc,fs); % AM sinyalinin elde edilmesi
subplot(3,1,2);
plot(t,y);
z=amdemod(y,fc,fs);
subplot(3,1,3);
plot(t,z);
subplot(3,1,1);
title('Mesaj Sinyali');
subplot(3,1,2);
title('Module Edilmis Sinyal');
subplot(3,1,3);
title('Demodule Edilmis Sinyal');
```

AM

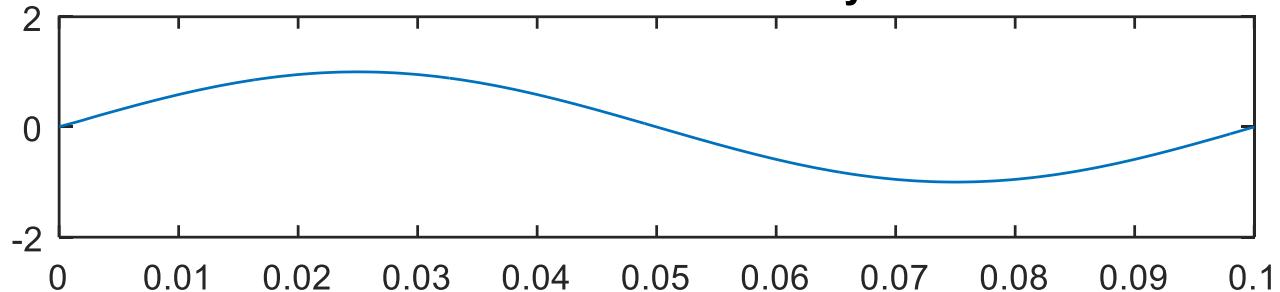
Mesaj Sinyali



Module Edilmis Sinyal



Demodule Edilmis Sinyal

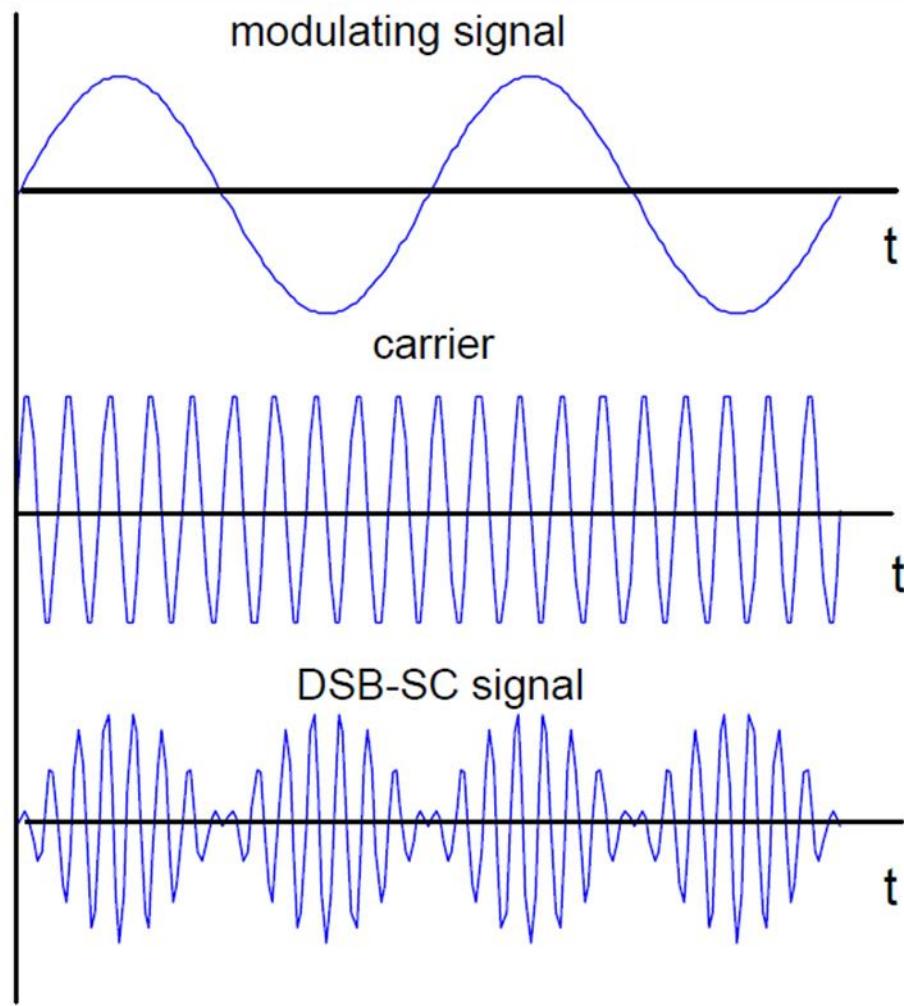


DSB - SC

$$V_m = V_m \cos \omega_m t$$

$$V_c = V_c \cos \omega_c t$$

$$V = V_m \cos \omega_m t + V_c \cos \omega_c t$$



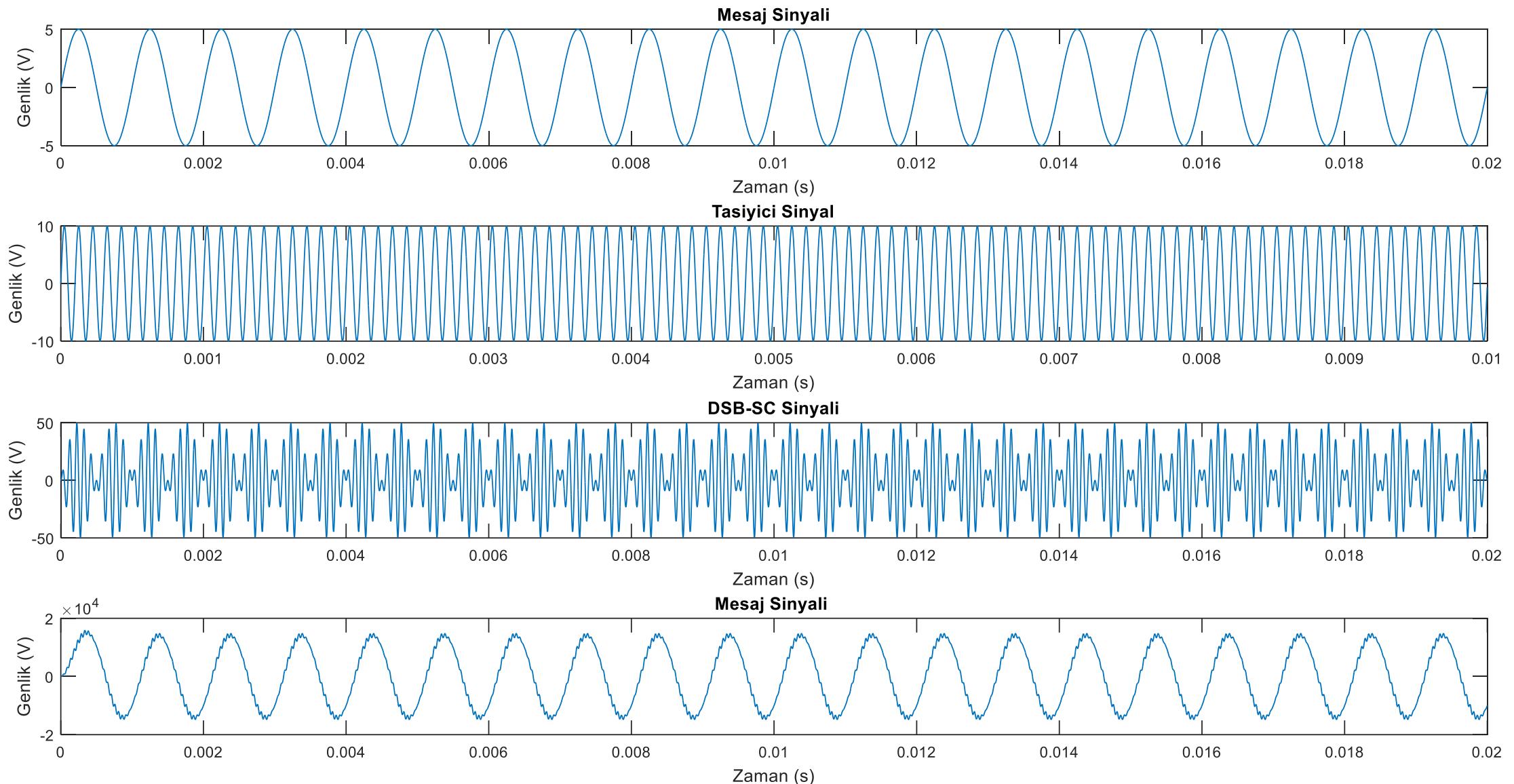
DSB - SC MODÜLASYON

```
clc % ekranı temizle
clear all % tanımlı değişkenleri temizle
close all % açık dosyaları kapat
t=linspace(0,0.02,10000); % sinyal zaman aralığı tanımı
fc=10000; % taşıyıcı sinyal frekansı
fm=1000; % mesaj sinyali frekansı
fs=40000; % örnekleme frekansı
Am=5; % mesaj sinyali genliği
Ac=10; % taşıyıcı sinyal genliği
m=Am/Ac; % AM modülasyon indis
wc=2*pi*fc*t; % taşıyıcı sinyal açısal frekans (rad)
wm=2*pi*fm*t; % mesaj sinyali açısal frekans (rad)
ec=Ac*sin(wc); % taşıyıcı sinyal
em=Am*sin(wm); % mesaj sinyali
y= em.*ec; % DSB-SC sinyali
```

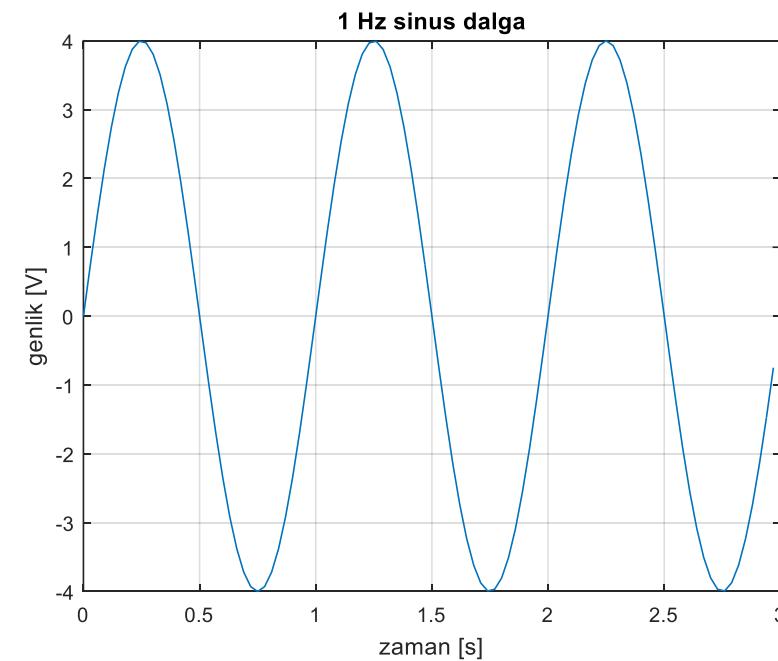
DSB - SC DEMODÜLASYON

```
z=y.*ec;
% Demodülasyon için DSB-SC sinyalinin taşıyıcı sinyal ile çarpılması
z1=conv(z,exp(-t/0.000159));
% Demodülasyonlu sinyalin alçak geçiren filtreden geçirilmesi
% AGF zaman sabiti exp(-t/RC),
% Kesim frekansı fm=200 fm=1/(2*pi*R*C)
% R=1 Kohm ve C=0.159 mikroFarad ise RC=0.000795
l=10000;
subplot(4,1,1), plot(t(1:l),em(1:l))
xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik (V)'); title('Mesaj Sinyali');
subplot(4,1,2),plot(t(1:l/2),ec(1:l/2))
xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik (V)'); title('Tasiyici Sinyal');
subplot(4,1,3),plot(t(1:l),y(1:l))
xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik (V)'); title('DSB-SC Sinyali');
subplot(4,1,4),plot(t(1:l),z1(1:l))
xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik (V)'); title('Mesaj Sinyali '');
```

DSB - SC

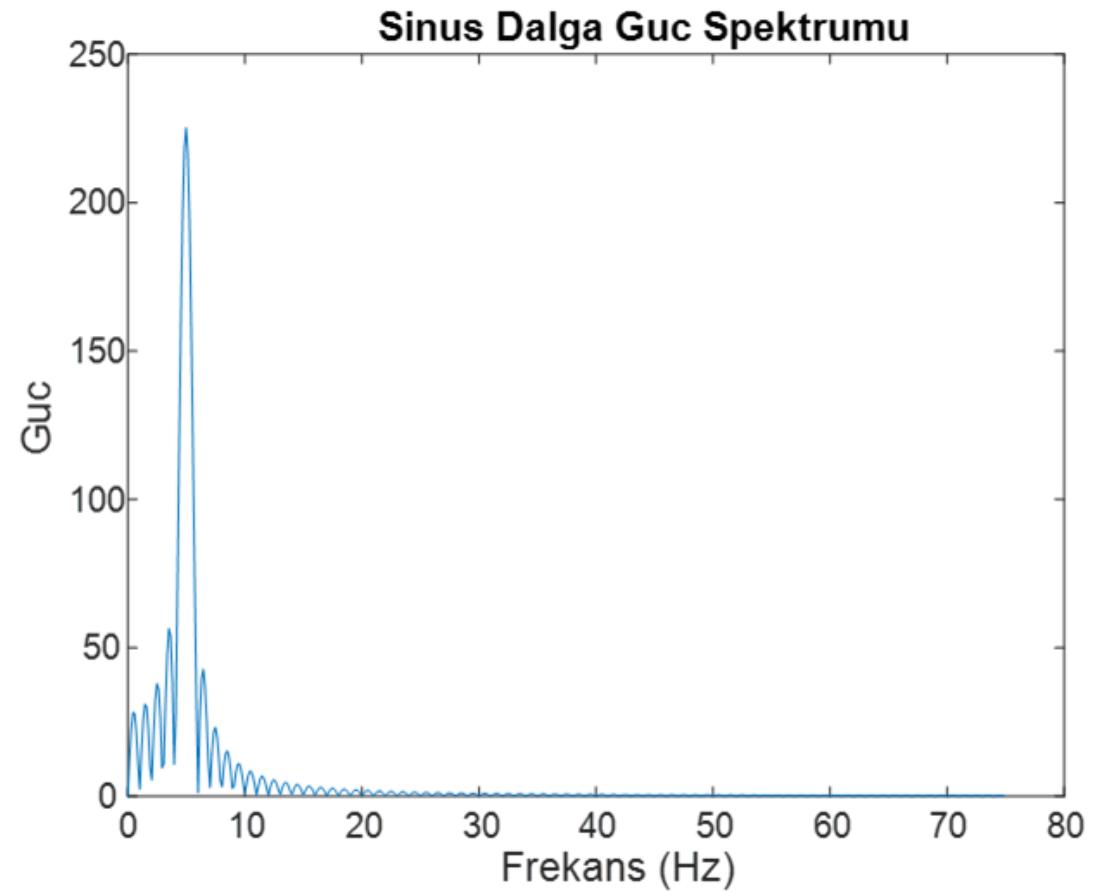
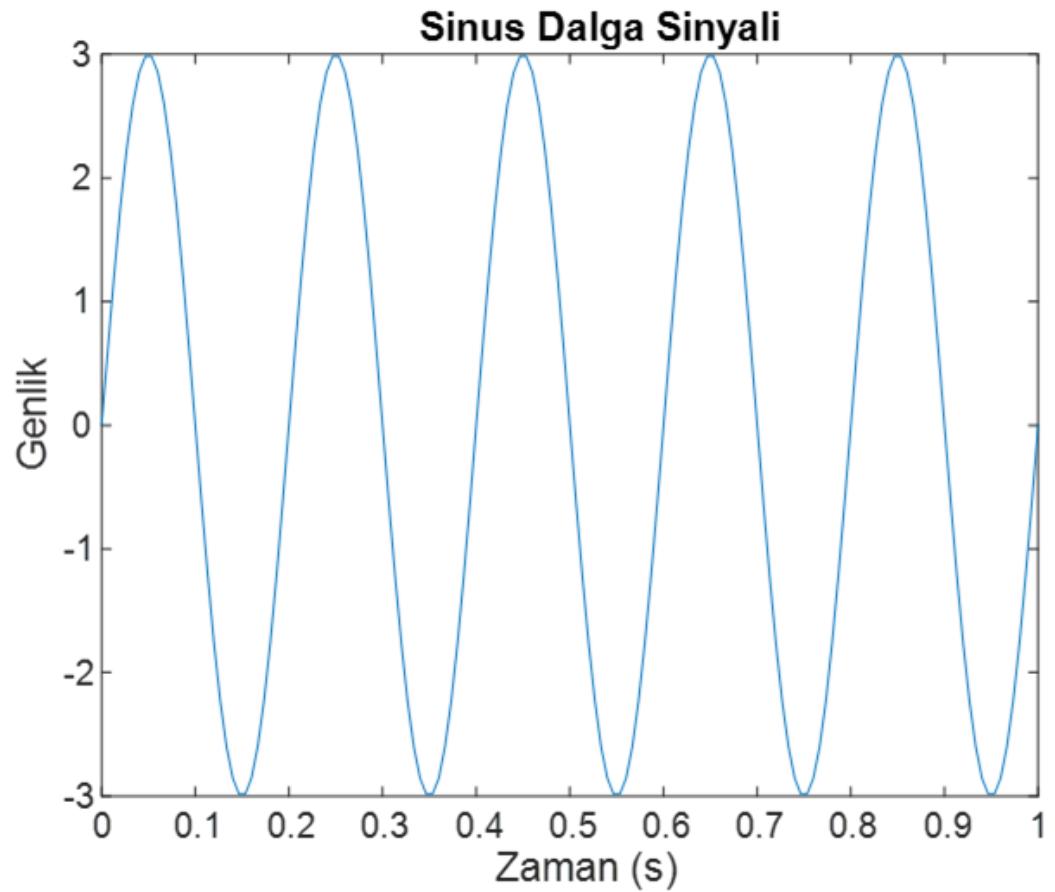


```
clc
close all
clear all
% 3 saniye uzunluğunda 100 veri noktası içeren zaman vektörü
t = 0 : 3*1/100 : 3*(1-1/100) ;
f=1;
% sinüzoidal sinyal
yt = 4 * sin ( 2 * pi * f * t + 0 );
plot ( t, yt );
xlabel ( 'zaman [s]' )
ylabel ( 'genlik [V]' )
title ( '1 Hz sinus dalga' )
grid on
```



```
Fs = 150; % Sampling frequency
t = 0:1/Fs:1; % Time vector of 1 second
f = 5; % Create a sine wave of f Hz.
A=3;
x = A*sin(2* pi*t*f);
nfft = 1024; % Length of FFT
X = fft(x,nfft); % Take fft, padding with zeros so that length(X) is equal to nfft
X = X(1:nfft/2); % FFT is symmetric, throw away second half
mx = abs(X); % Take the magnitude of fft of x
f = (0:nfft/2-1)*Fs/nfft; % Frequency vector
figure(1);
plot(t,x);
title('Sinus Dalga Sinyali'); xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik');
figure
plot(f,mx);
title('Sinus Dalga Guc Spektrumu'); xlabel('Frekans (Hz)'); ylabel('Guc');
```

FREKANS ANALİZİ



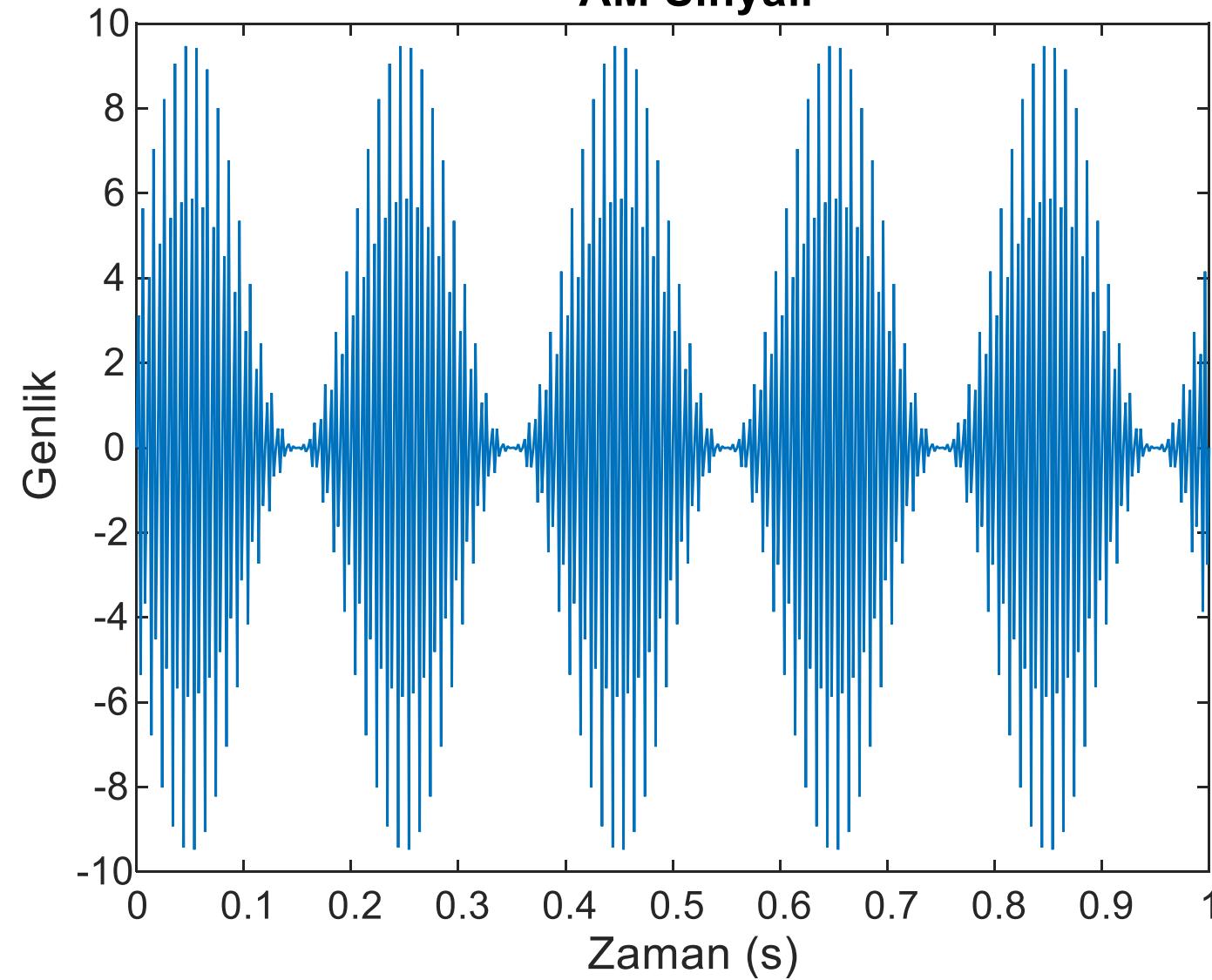
AM FREKANS ANALİZİ

```
fc=200;          % taşıyıcı sinyal frekansı
fm=5;           % mesaj sinyali frekansı
Fs = 500;        % Sampling frequency
t = 0:1/Fs:1;   % Time vector of 1 second
Am=5;           % mesaj sinyali genliği
Ac=5;           % taşıyıcı sinyal genliği
m=Am/Ac ;       % AM modülasyon indisi
wc=2*pi*fc.*t; % taşıyıcı sinyal açısal frekans (rad)
wm=2*pi*fm.*t; % mesaj sinyali açısal frekans (rad)
ec=Ac*sin(wc); % taşıyıcı sinyal
em=Am*sin(wm); % mesaj sinyali
x=Ac.*(1+m.*sin(wm)).*sin(wc); % AM sinyali
```

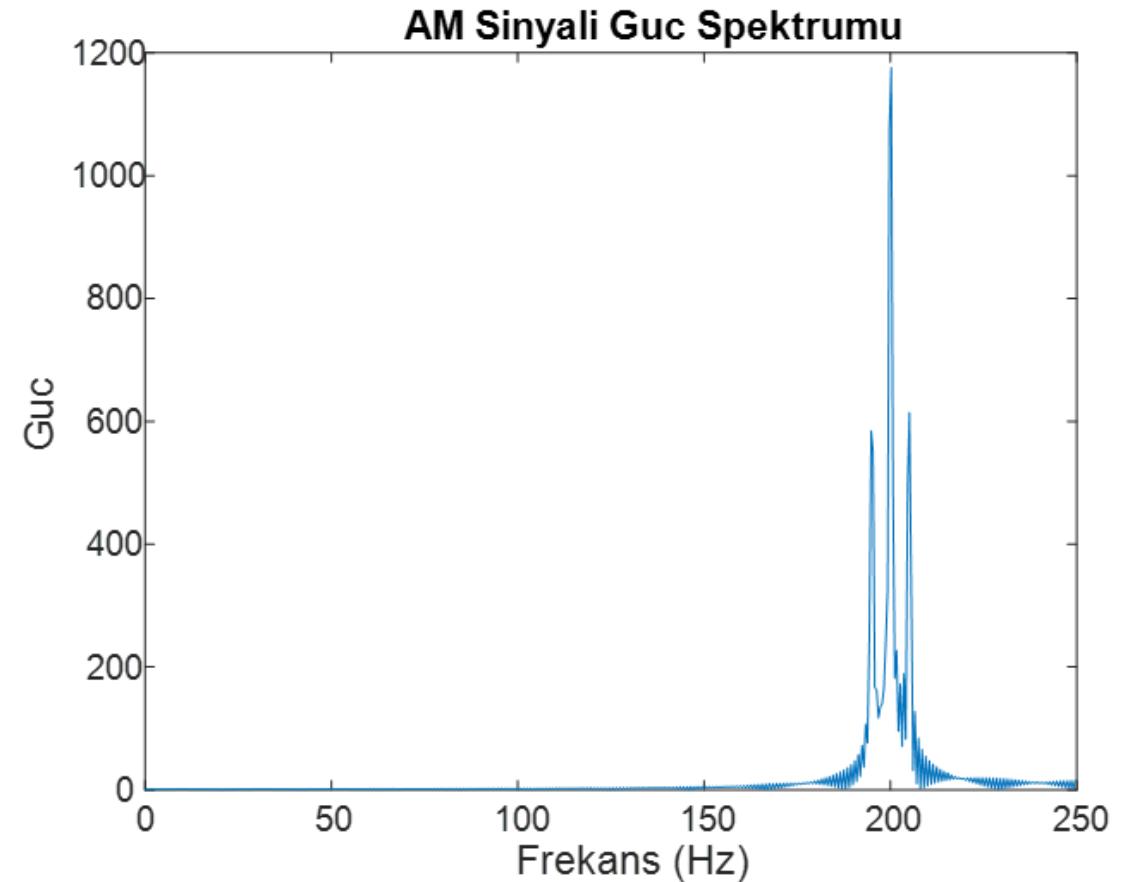
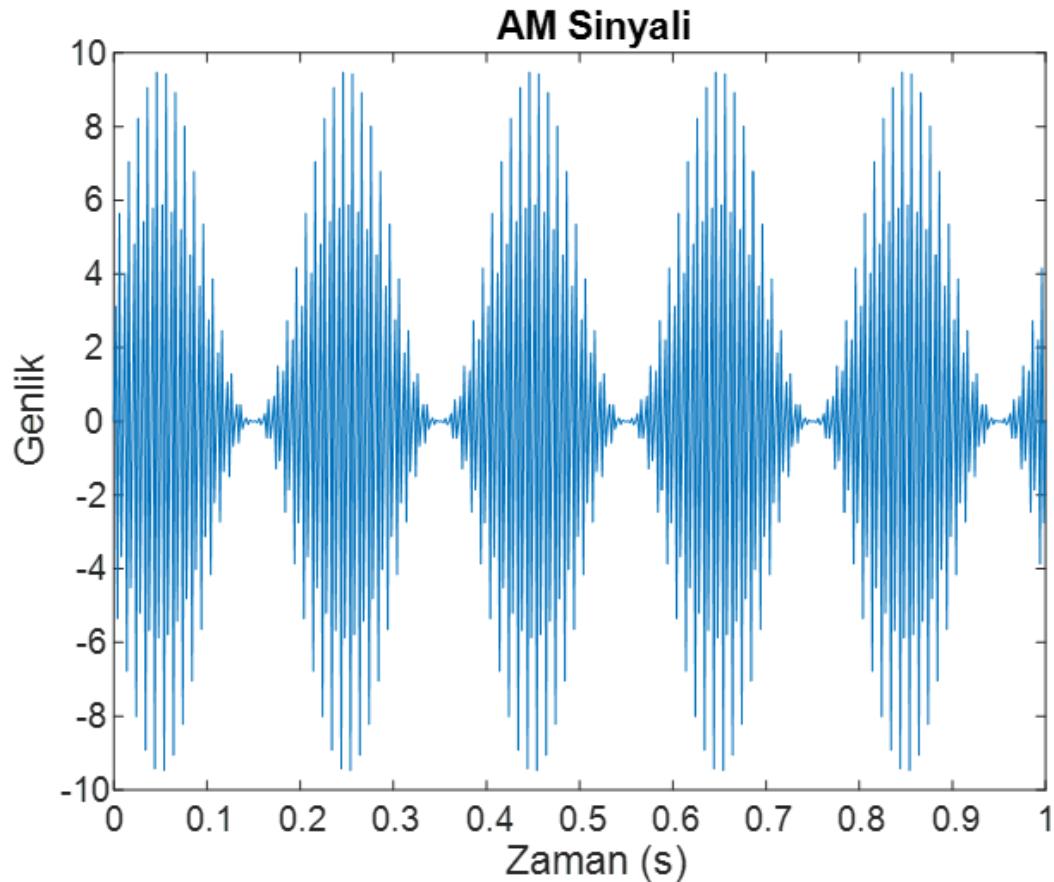
```
nfft = 1024; % Length of FFT
X = fft(x,nfft); % Take fft, padding with zeros so that length(X) is equal to nfft
X = X(1:nfft/2); % FFT is symmetric, throw away second half
mx = abs(X); % Take the magnitude of fft of x
f = (0:nfft/2-1)*Fs/nfft; % Frequency vector
figure(1);
plot(t,x);
title('AM Sinyali'); xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik');
figure
plot(f,mx);
title('AM Sinyali Guc Spektrumu'); xlabel('Frekans (Hz)'); ylabel('Guc');
```

AM SİNYALİ

AM Sinyali



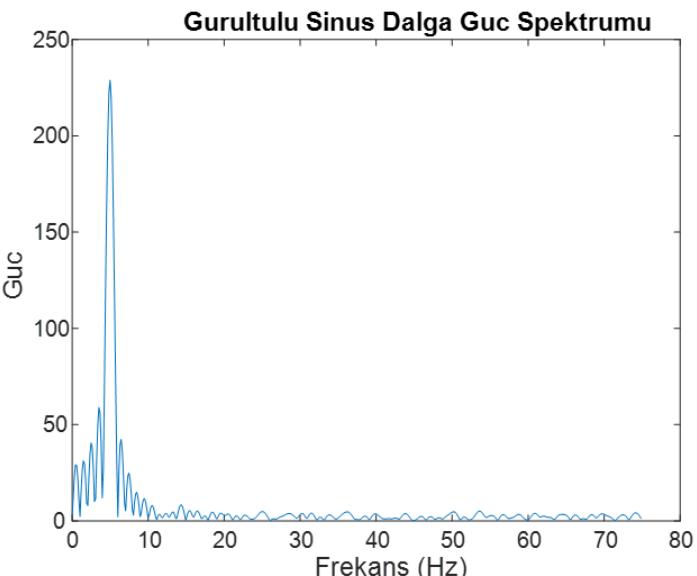
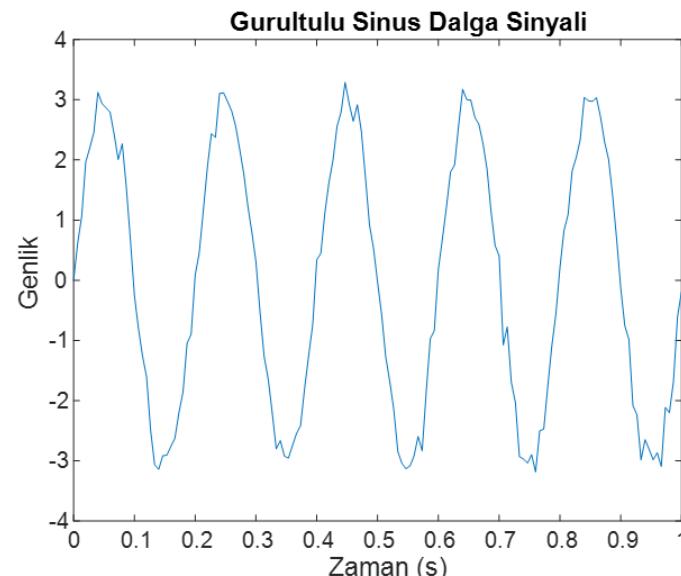
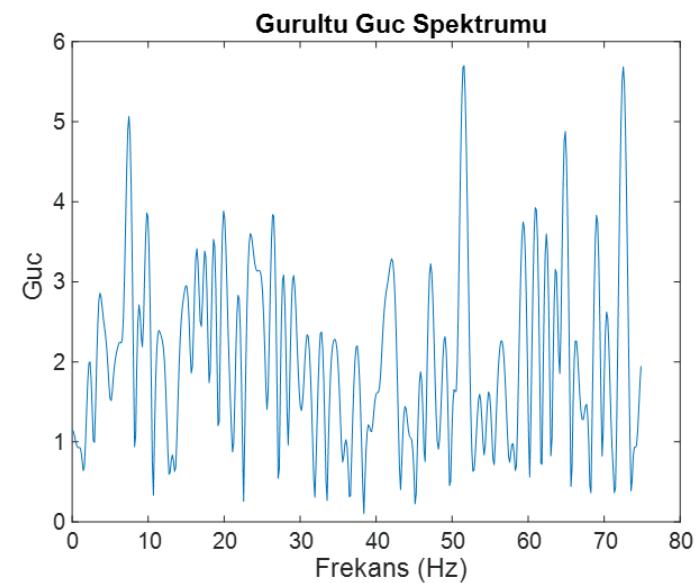
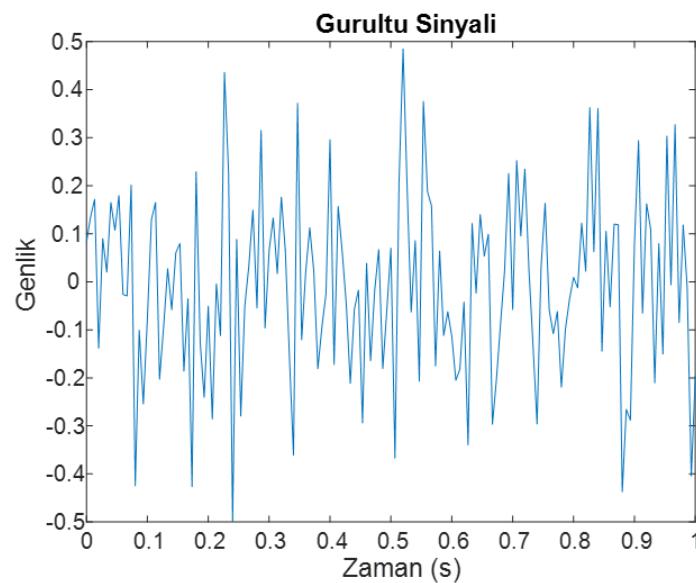
AM FREKANS ANALİZİ



SİNÜZOİDAL SİNYAL GÜRÜLTÜ ETKİSİ

```
Fs = 150; % Sampling frequency
t = 0:1/Fs:1; % Time vector of 1 second
f = 5; % Create a sine wave of f Hz.
A=3;
x = A*sin(2* pi*t*f)+0.2*randn ( 1, length ( t ) );
nfft = 1024; % Length of FFT
X = fft(x,nfft); % Take fft, padding with zeros so that length(X) is equal to nfft
X = X(1:nfft/2); % FFT is symmetric, throw away second half
mx = abs(X); % Take the magnitude of fft of x
f = (0:nfft/2-1)*Fs/nfft; % Frequency vector
figure(1);
plot(t,x);
title('Gurultulu Sinus Dalga Sinyali'); xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik');
figure
plot(f,mx);
title('Gurultulu Sinus Dalga Guc Spektrumu'); xlabel('Frekans (Hz)'); ylabel('Guc');
```

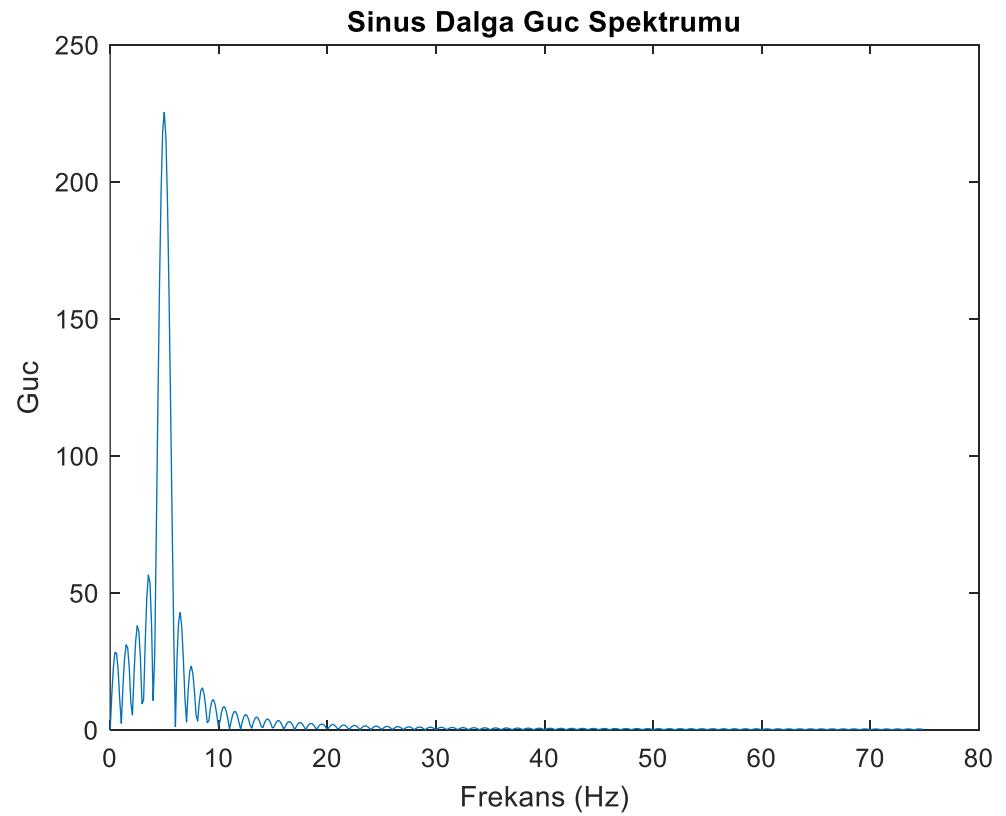
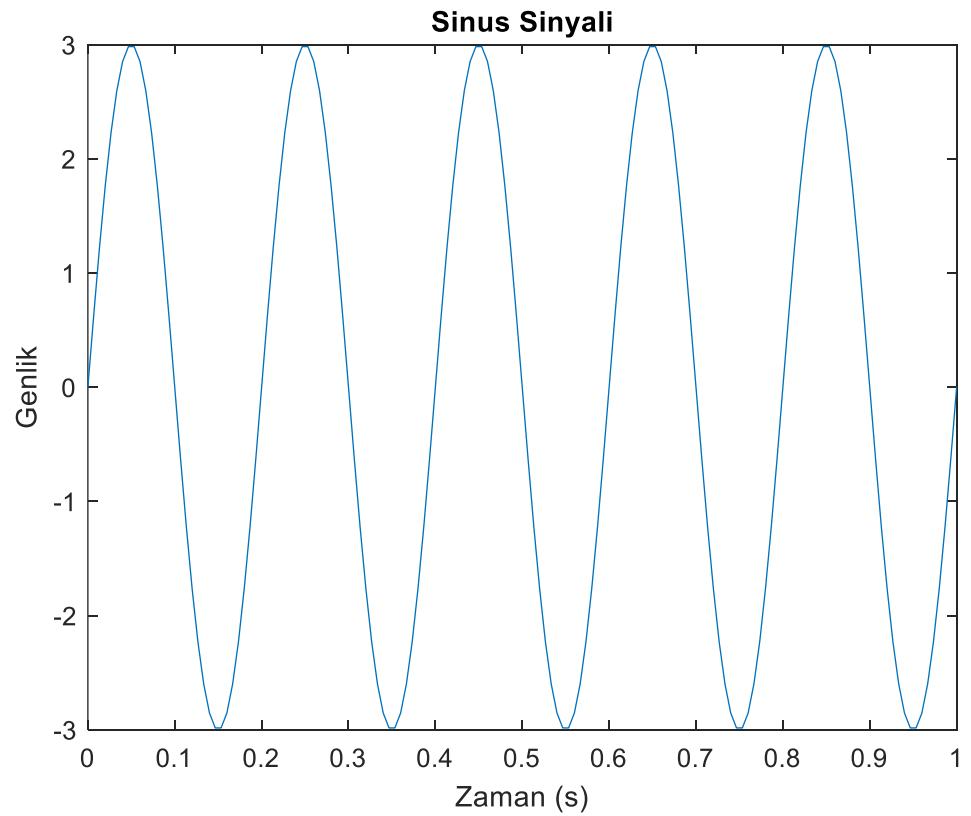
SİNÜZOİDAL SİNYAL GÜRÜLTÜ ETKİSİ



AM GÜRÜLTÜ ETKİSİ

```
clc
clear all
close all
Fs = 150; % Sampling frequency
t = 0:1/Fs:1; % Time vector of 1 second
f = 5; % Create a sine wave of f Hz.
A=3;
x = A*sin(2* pi*t*f);
figure(1);
plot(t,x);
title('Sinus Sinyali'); xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik');
nfft = 1024; % Length of FFT
X = fft(x,nfft); % Take fft, padding with zeros so that length(X) is equal to nfft
X = X(1:nfft/2); % FFT is symmetric, throw away second half
mx = abs(X); % Take the magnitude of fft of x
f = (0:nfft/2-1)*Fs/nfft; % Frequency vector
figure(2)
plot(f,mx);
title('Sinus Dalga Guc Spektrumu'); xlabel('Frekans (Hz)'); ylabel('Guc');
```

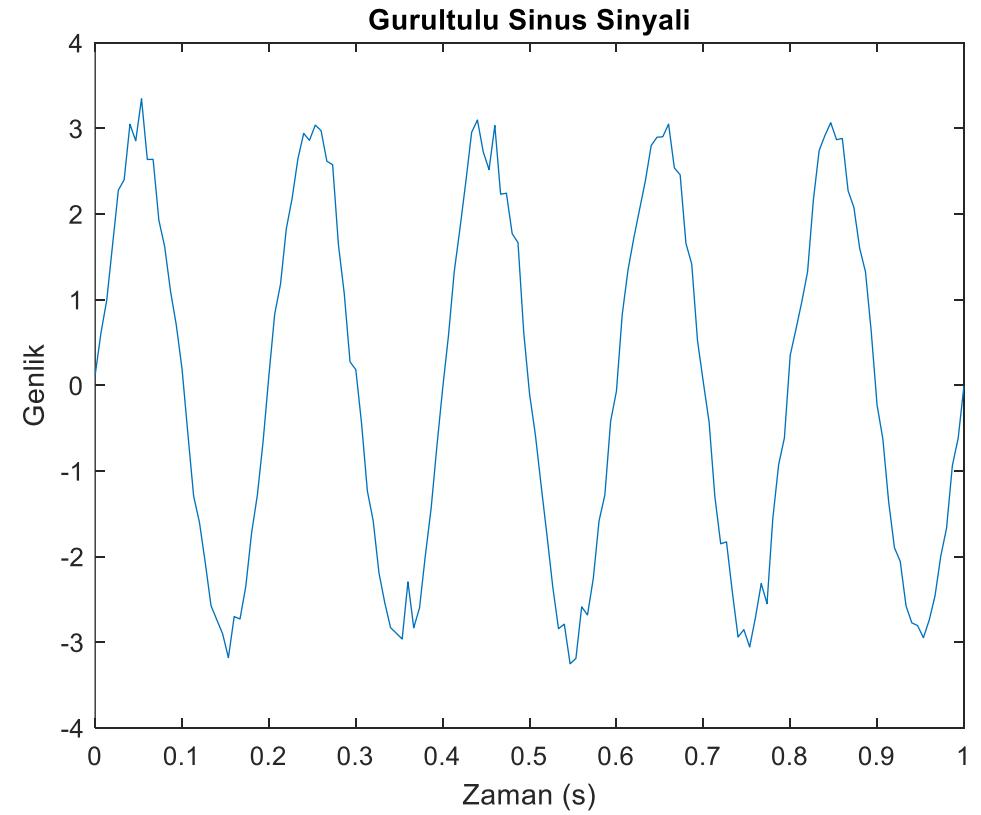
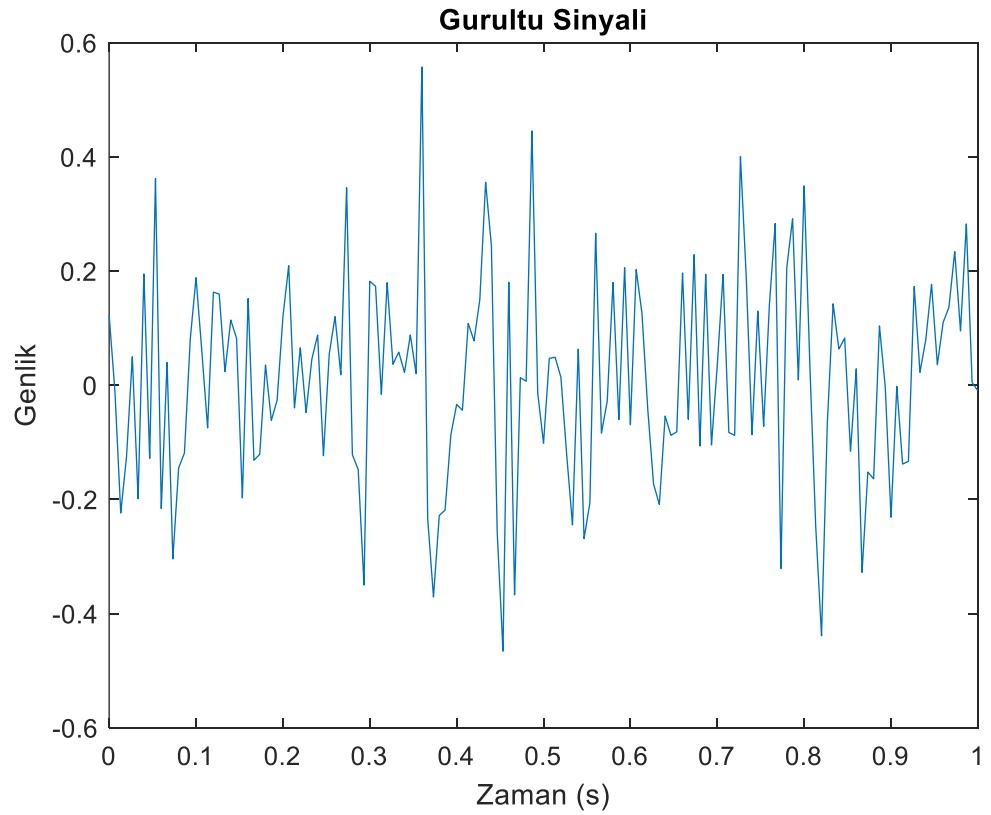
AM GÜRÜLTÜ ETKİSİ



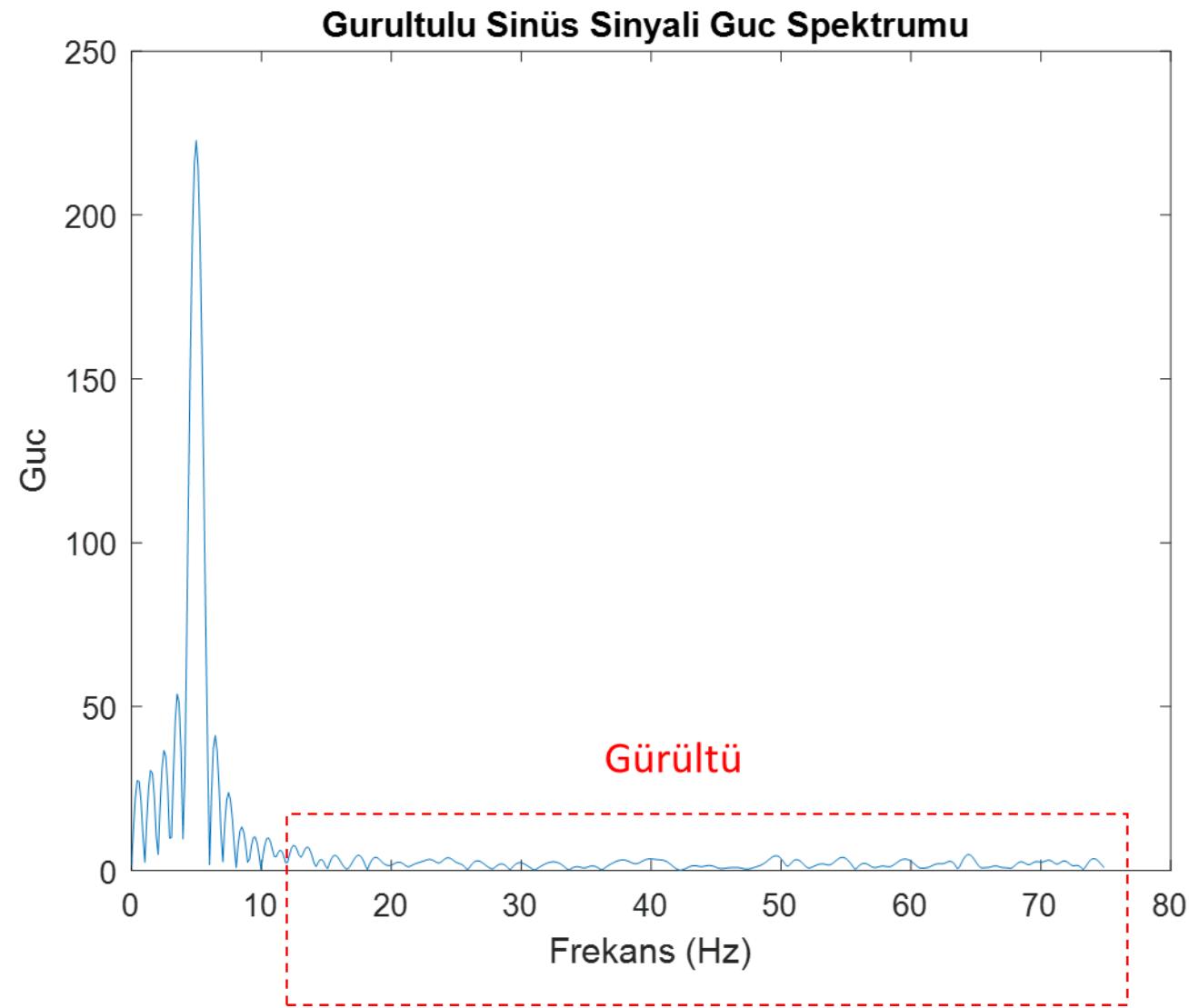
AM GÜRÜLTÜ ETKİSİ

```
% Gürültülü sinyal
n= 0.2*randn ( 1, length ( t ) );
figure(3)
plot(t,n);
title('Gurultu Sinyali'); xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik');
xx = x + n;
figure(4);
plot(t,xx);
title('Gurultulu Sinus Sinyali'); xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik');
XX = fft(xx,nfft); % Take fft, padding with zeros so that length(X) is equal to nfft
XX = XX(1:nfft/2); % FFT is symmetric, throw away second half
mX = abs(XX); % Take the magnitude of fft of x
figure(5)
plot(f,mX);
title('Gurultulu Sinüs Sinyali Guc Spektrumu'); xlabel('Frekans (Hz)'); ylabel('Guc');
```

AM GÜRÜLTÜ ETKİSİ



AM GÜRÜLTÜ ETKİSİ

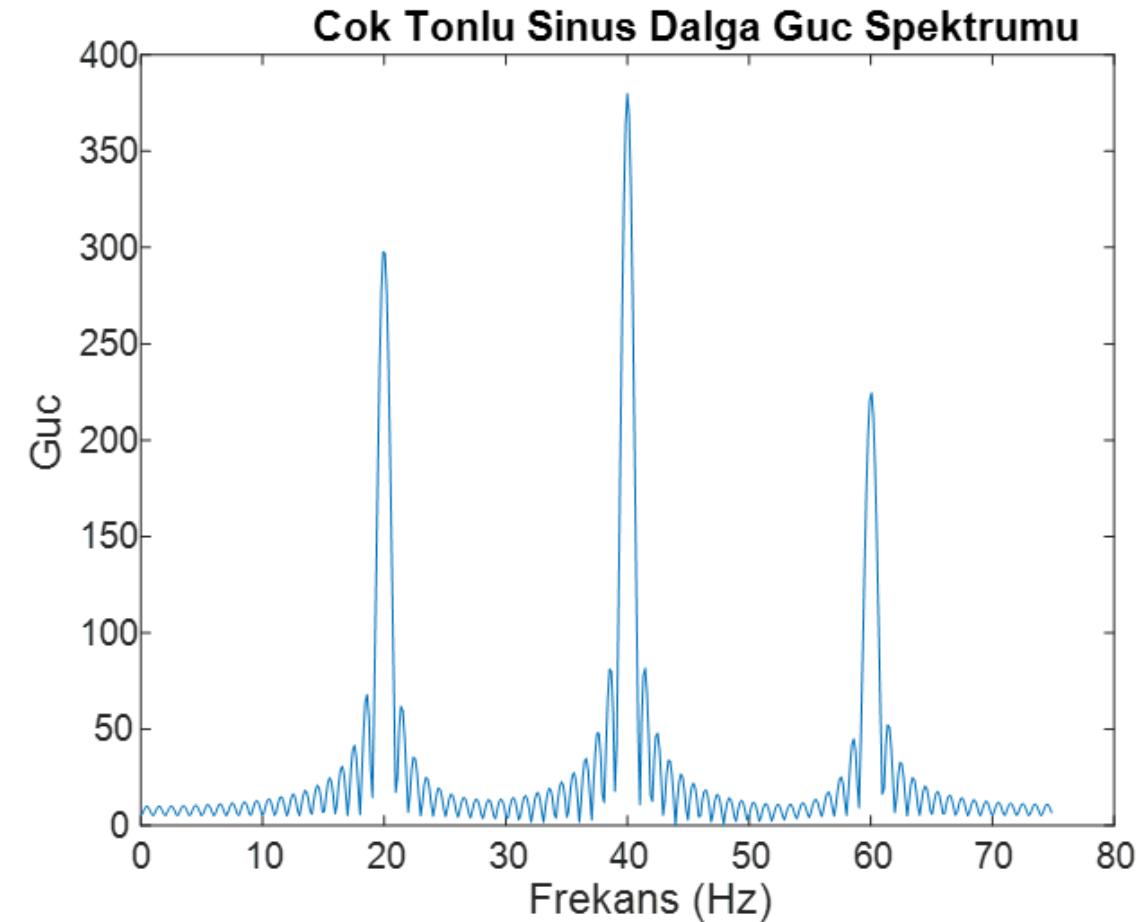
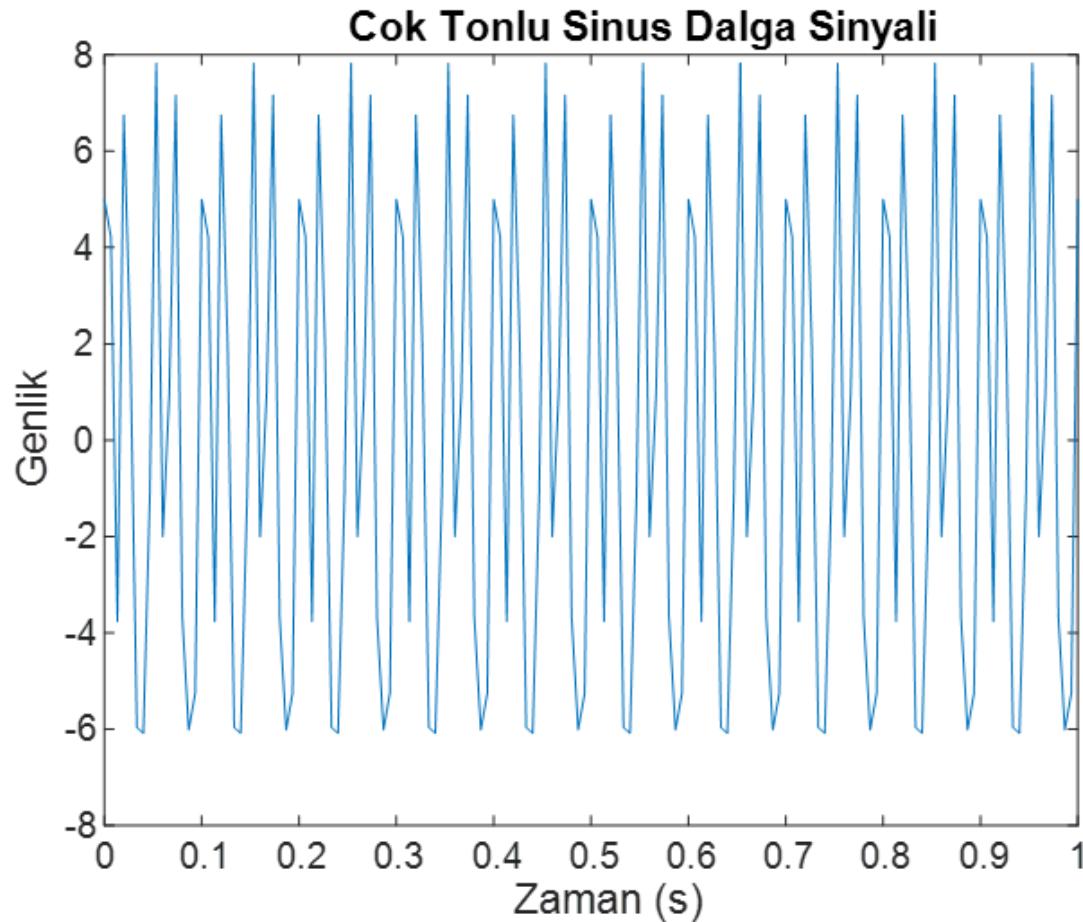


ÇOK TONLU MESAJ SİNYALİ

```
Fs = 150; % Sampling frequency
t = 0:1/Fs:1; % Time vector of 1 second
x= 3*sin(2*pi*60*t) + 5*cos(2*pi*40*t) + 4*sin(2*pi*20*t) ;
nfft = 1024; % Length of FFT
X = fft(x,nfft); % Take fft, padding with zeros so that length(X) is equal to nfft
X = X(1:nfft/2); % FFT is symmetric, throw away second half
mx = abs(X); % Take the magnitude of fft of x
f = (0:nfft/2-1)*Fs/nfft; % Frequency vector
figure(1);
plot(t,x);
title('Cok Tonlu Sinus Dalga Sinyali'); xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik');
figure
plot(f,mx);
title('Cok Tonlu Sinus Dalga Guc Spektrumu'); xlabel('Frekans (Hz)'); ylabel('Guc');
```

ÇOK TONLU MESAJ SİNYALİ

$$x = 3\sin(2\pi \cdot 60 \cdot t) + 5\cos(2\pi \cdot 40 \cdot t) + 4\sin(2\pi \cdot 20 \cdot t);$$





Thank You

hakki.soy@karatay.edu.tr