



Dr. Sadık YILDIZ

sadikyildiz06@gmail.com

**Gazi Üniversitesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği
(Teknoloji Fakültesi)**

2025– ANKARA

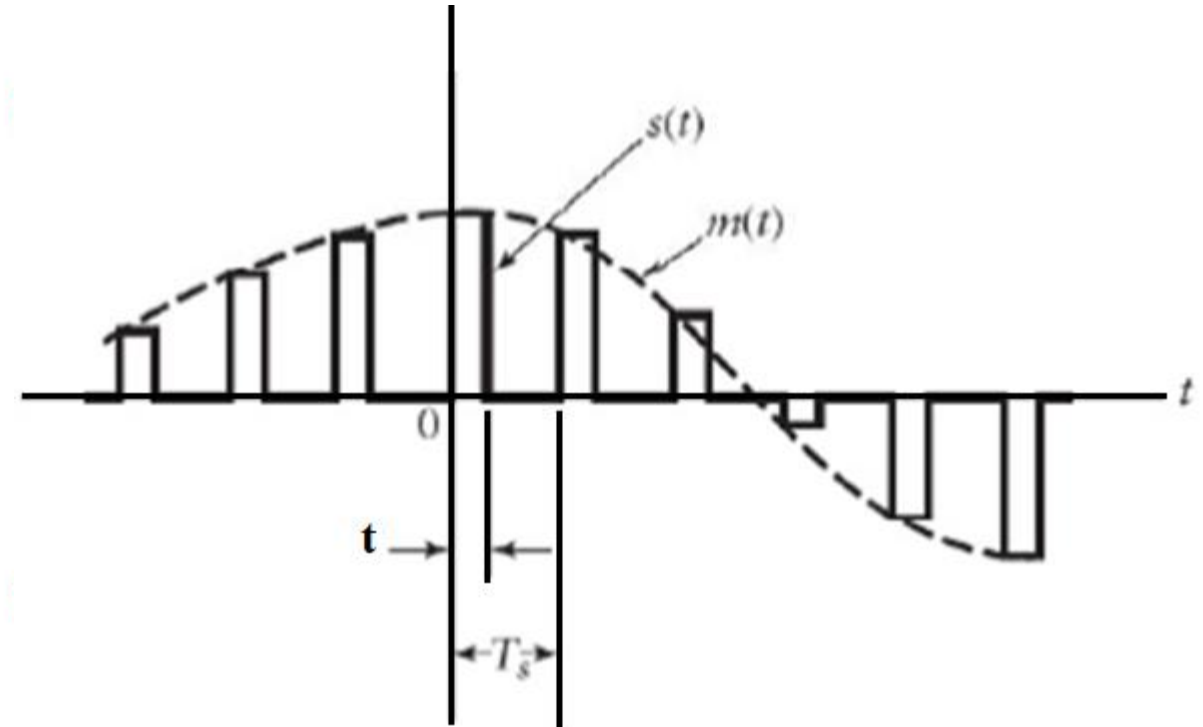
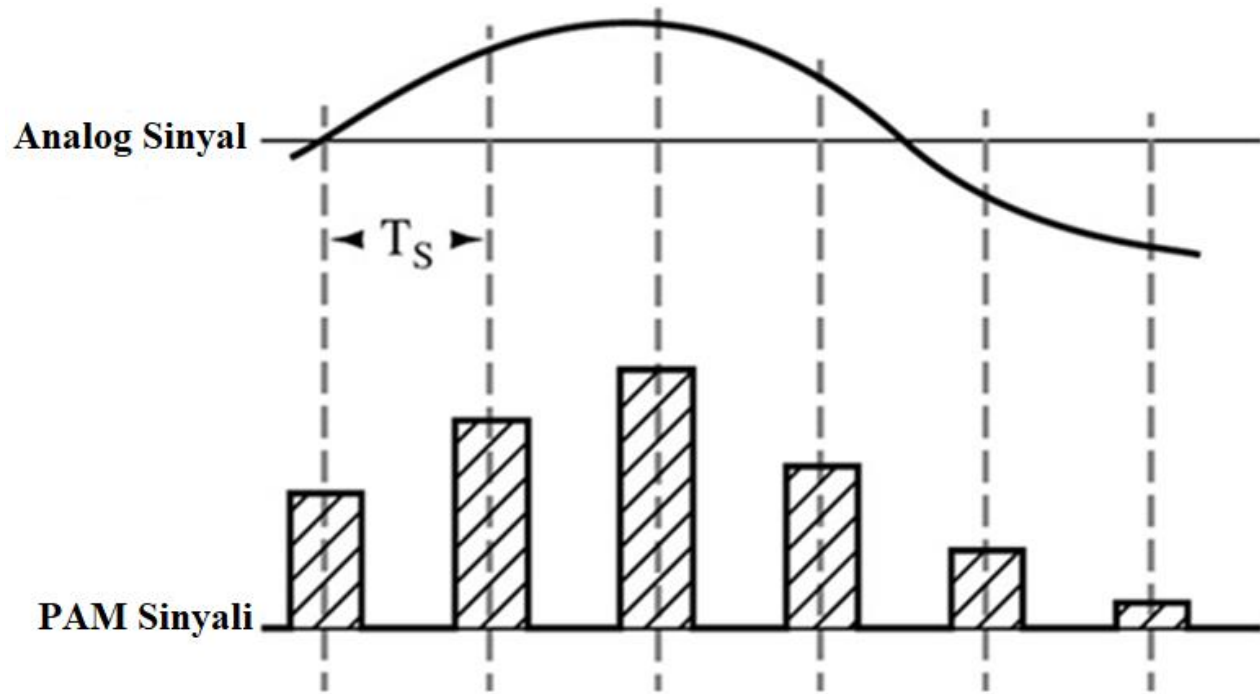
PAM modülatörü ve demodülatörü

➤ PAM (PULSE AMPLITUDE MODULATION) modülasyonu

- PAM, sürekli veya ayırık zamanlı bir sinyalin genlik seviyelerinin, bir taşıyıcı darbe dizisiyle modüle edilmesiyle elde edilir.
- Özellikleri:
 - Genlik modülasyonuna benzer, ancak sürekli dalga yerine darbeler kullanılır.
 - Analog veya sayısal sinyaller modüle edilebilir.
 - Örnekleme işlemi içerir.
- PAM, dijital haberleşmede QAM, PSK gibi modülasyon türlerine temel oluşturur.

PAM modülatörü ve demodülatörü

➤ PAM modülasyonu



PAM modülatörü ve demodülatörü

➤ PAM modülasyonu

- Verilen bir mesaj sinyali $m(t)$ için PAM sinyali şu şekilde ifade edilir:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s) \cdot p(t - nT_s)$$

- Burada;
 - $m(t) \rightarrow$ Modüle edilecek mesaj sinyali
 - $T_s \rightarrow$ Örnekleme periyodu
 - $m(nT_s) \rightarrow$ Mesaj sinyalinin örneklenmiş değerleri
 - $p(t) \rightarrow$ Darbe şekli (örneğin dikdörtgen darbe)

PAM modülatörü ve demodülatörü

➤ PAM modülasyonu

- Verilen bir mesaj sinyali $m(t)$ için PAM sinyali şu şekilde ifade edilir:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s) \cdot p(t - nT_s)$$

- Burada;
 - $m(t) \rightarrow$ Modüle edilecek mesaj sinyali
 - $T_s \rightarrow$ Örnekleme periyodu
 - $m(nT_s) \rightarrow$ Mesaj sinyalinin örneklenmiş değerleri
 - $p(t) \rightarrow$ Darbe şekli (örneğin dikdörtgen darbe)
- PAM modülasyonunda genellikle dikdörtgen darbeler kullanılır:

$$p(t) = \begin{cases} 1 & , \quad 0 \leq t \leq T_p \\ 0 & , \quad \text{Diğer durumlarda} \end{cases}$$

- Burada;
 - $T_p \rightarrow$ Darbe süresi

✚ Eğer $m(nT_s)$ yalnızca belirli ayrık seviyeleri alabiliyorsa, bu sayısal PAM'dır.

PAM modülatörü ve demodülatörü

➤ PAM Modülasyonunun Spektrum Analizi

- PAM sinyalinin frekans spektrumu örnekleme teoremi ile ilişkilidir.
- PAM sinyalinin Fourier dönüşümü şu şekildedir:

$$S(f) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} M(f - kf_s)$$

- Burada;
 - $M(f) \rightarrow$ mesaj sinyalinin Fourier dönüşümüdür.
 - $f_s = \frac{1}{T_s} \rightarrow$, örnekleme frekansıdır.
 - $S(f) \rightarrow$ PAM sinyalinin spektrumudur.

✂ PAM modülasyonu sonucunda spektrumda, mesaj sinyalinin temel bileşenlerinin yanı sıra örnekleme frekansının katlarında tekrar eden bileşenler oluşur.

PAM modülatörü ve demodülatörü

➤ PAM Modülasyonunun Spektrum Analizi

- PAM sinyalinin frekans spektrumu örnekleme teoremi ile ilişkilidir.
- PAM sinyalinin Fourier dönüşümü şu şekildedir:

$$S(f) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} M(f - kf_s)$$

- Burada;
 - $M(f) \rightarrow$ mesaj sinyalinin Fourier dönüşümüdür.
 - $f_s = \frac{1}{T_s} \rightarrow$, örnekleme frekansıdır.
 - $S(f) \rightarrow$ PAM sinyalinin spektrumudur.

✂ PAM modülasyonu sonucunda spektrumda, mesaj sinyalinin temel bileşenlerinin yanı sıra örnekleme frekansının katlarında tekrar eden bileşenler oluşur.

PAM modülatörü ve demodülatörü

➤ PAM demodülasyonu

- PAM sinyalinden tekrar mesaj sinyalini elde etmek için demodülasyon işlemi yapılır.
- Temel adımlar:
 1. **Filtreleme:** PAM sinyalinden yüksek frekans bileşenlerini çıkarmak için Alçak Geçiren Filtre kullanılır.
 2. **Düzgünleştirme:** Filtre çıkışındaki basamaklı sinyalin düzgün hale getirilmesi gerekir.

Matematiksel olarak Demodüle edilen sinyal;

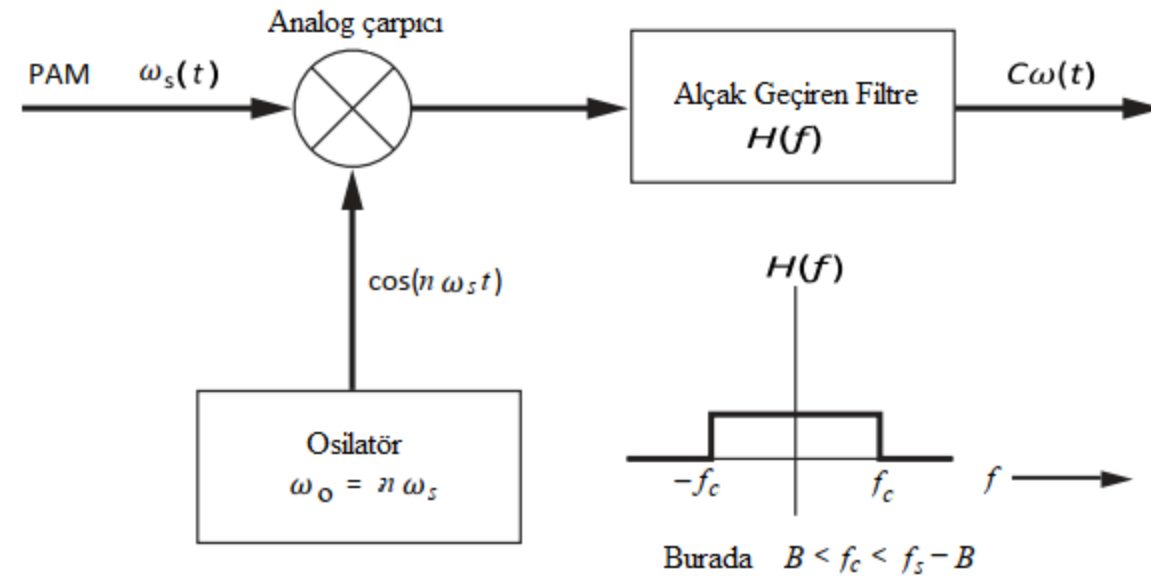
$$\hat{m}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f)H(f)e^{j2\pi ft}df$$

- Burada;
 - $H(f) \rightarrow$ **alçak geçiren filtrenin** transfer fonksiyonudur.

📌 Alçak geçiren filtrenin **kesim frekansı**, mesaj sinyalinin **en yüksek frekans bileşeninden** biraz büyük olmalıdır.

PAM modülatörü ve demodülatörü

➤ PAM demodülasyonu



PAM modülatörü ve demodülatörü

➤ PAM modülasyonunun avantajları ve dezavantajları

- **✓ Avantajları:**
 - Basit bir modülasyon tekniğidir.
 - Analog ve sayısal sistemlerle uyumludur.
 - Verimli bir bant genişliği kullanımı sağlar.
- **✗ Dezavantajları:**
 - Gürültüye karşı duyarlıdır.
 - Güç tüketimi yüksektir.
 - Demodülasyon sırasında alçak geçiren filtre nedeniyle bilgi kaybı olabilir.

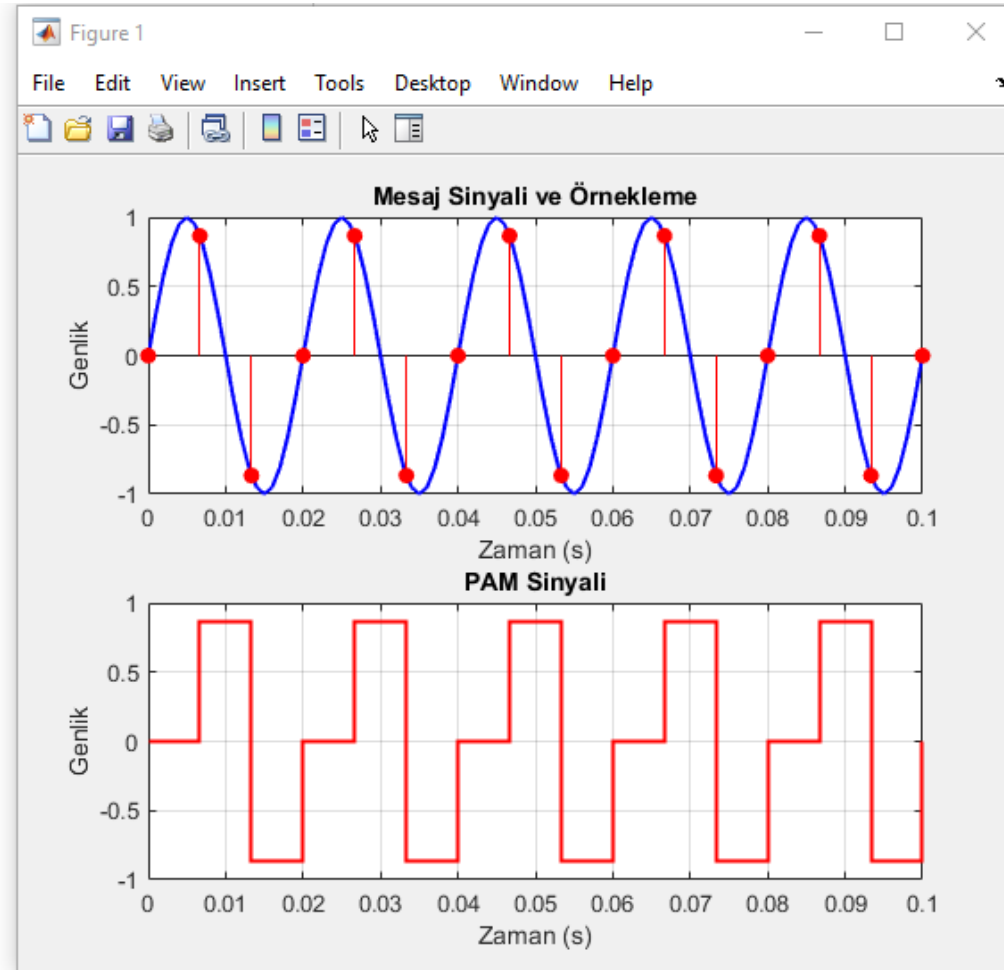
PAM modölatörü ve demodölatörü

➤ PAM modölatyonu

```

1 -   clc; clear; close all;
2
3 -   fs = 1000; % Örnekleme frekansı
4 -   t = 0:1/fs:0.1; % Zaman eksenı
5 -   m = sin(2*pi*50*t); % Mesaj sinyalı
6
7 -   % PAM Modölatyonu (Dikdörtgen Darbeler ile)
8 -   Ts = 1/150; % Örnekleme süresi
9 -   n = 0:Ts:max(t);
10 -  m_n = sin(2*pi*50*n); % Örneklelenmiş mesaj sinyalı
11
12 -  % Çizimler
13 -  figure;
14 -  subplot(2,1,1);
15 -  plot(t,m,'b', 'LineWidth',1.5); hold on;
16 -  stem(n,m_n,'r','filled'); % Örnekleme noktaları
17 -  xlabel('Zaman (s)');
18 -  ylabel('Genlik');
19 -  title('Mesaj Sinyalı ve Örnekleme');
20 -  grid on;
21
22 -  subplot(2,1,2);
23 -  stairs(n,m_n,'r', 'LineWidth',1.5);
24 -  xlabel('Zaman (s)');
25 -  ylabel('Genlik');
26 -  title('PAM Sinyalı');
27 -  grid on;
28

```



PAM modölatörü ve demodölatörü

➤ PAM demodölasyonu

```

1 - clc; clear; close all;
2
3 - fs = 1000; % Örnekleme frekansı
4 - t = 0:1/fs:0.1; % Zaman eksenı
5
6 % 2-bitlik rastgele veri oluşturma (0, 1, 2, 3 değęerlerini alabilir)
7 - data = randi([0 3], 1, length(t));
8
9 % 4-Seviyeli PAM genlik seviyeleri: -3, -1, 1, 3
10 - pam_levels = [-3 -1 1 3];
11
12 % PAM Modölasyonu: Veri noktaları uygun seviyeye çevrilir
13 - pam_signal = pam_levels(data + 1);
14
15 % Alçak Geçiren Filtreleme ile Demodölasyon
16 - fc = 100; % Kesim frekansı
17 - [b,a] = butter(5, fc/(fs/2)); % 5. dereceden Butterworth filtresi
18 - demod_signal = filter(b, a, pam_signal);
19
20 % Demodüle edilen verinin sayısal seviyelere geri dönüşmesi
21 % Her seviye için en yakın PAM seviyesini bulma
22 - decoded_data = zeros(size(demod_signal));
23 - for i = 1:length(demod_signal)
24 -     [~, idx] = min(abs(pam_levels - demod_signal(i))); % En yakın PAM seviyesi
25 -     decoded_data(i) = pam_levels(idx); % Seçilen PAM seviyesi
26 - end
27

```

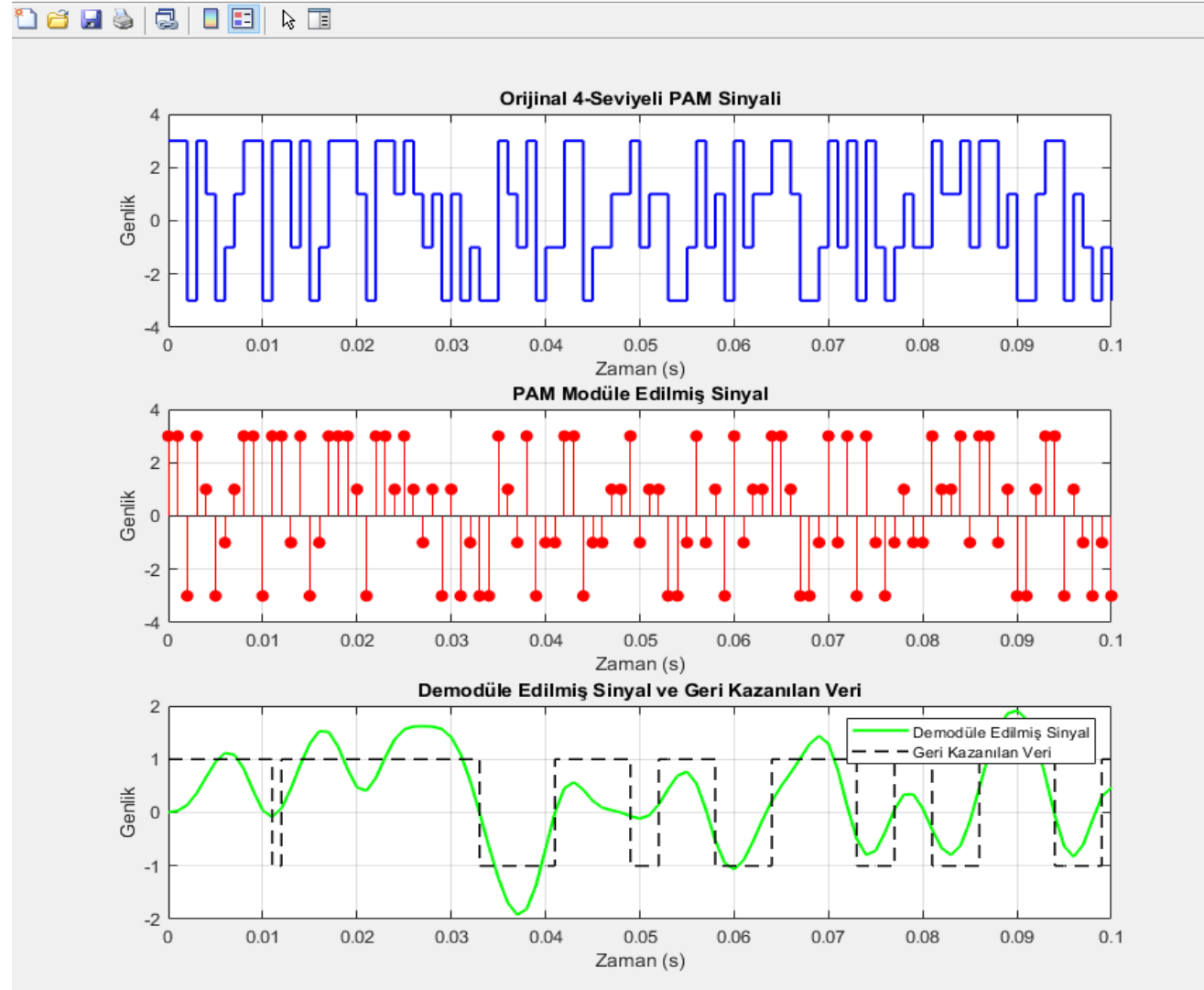
```

28 % Grafikler
29 - figure;
30
31 % 1. Grafik: Orijinal 2-bitlik veri (Sinyal seviyeleri)
32 - subplot(3,1,1);
33 - stairs(t, pam_levels(data + 1), 'b', 'LineWidth', 1.5);
34 - xlabel('Zaman (s)');
35 - ylabel('Genlik');
36 - title('Orijinal 4-Seviyeli PAM Sinyali');
37 - grid on;
38
39 % 2. Grafik: PAM Modüle Edilmiş Sinyal
40 - subplot(3,1,2);
41 - stem(t, pam_signal, 'r', 'filled');
42 - xlabel('Zaman (s)');
43 - ylabel('Genlik');
44 - title('PAM Modüle Edilmiş Sinyal');
45 - grid on;
46
47 % 3. Grafik: Demodüle Edilmiş Sinyal (Filtre Sonucu)
48 - subplot(3,1,3);
49 - plot(t, demod_signal, 'g', 'LineWidth', 1.5);
50 - hold on;
51 - stairs(t, decoded_data, 'k--', 'LineWidth', 1.2); % Geri kazanılan veri
52 - xlabel('Zaman (s)');
53 - ylabel('Genlik');
54 - title('Demodüle Edilmiş Sinyal ve Geri Kazanılan Veri');
55 - legend('Demodüle Edilmiş Sinyal', 'Geri Kazanılan Veri');
56 - grid on;

```

➤ PAM demodülasyonu

PAM modülatörü ve demodülatörü



PAM modölatörü ve demodölatörü

➤ PAM modölasyonu ve demodölasyonu

```

1 - clc; clear; close all;
2
3 - fs = 1000; % Örnekleme frekansı
4 - t = 0:1/fs:0.1; % Sürekli zaman eksenı
5 - m = sin(2*pi*50*t); % Mesaj sinyali
6
7 % PAM Modölasyonu (Örnekleme)
8 - Ts = 1/250; % Örnekleme periyodu (Dikdörtgen darbeler için)
9 - n = 0:Ts:max(t); % Örnekleme anları
10 - m_n = sin(2*pi*50*n); % Örneklenmiş mesaj sinyali (PAM Darbeleri)
11
12 % Çizimler - PAM Modölasyonu
13 - figure;
14 - subplot(3,1,1);
15 - plot(t, m, 'b', 'LineWidth', 1.5); hold on;
16 - stem(n, m_n, 'r', 'filled'); % Örnekleme noktaları
17 - xlabel('Zaman (s)');
18 - ylabel('Genlik');
19 - title('Mesaj Sinyali ve Örnekleme');
20 - grid on;
21
22 - subplot(3,1,2);
23 - stairs(n, m_n, 'r', 'LineWidth', 1.5);
24 - xlabel('Zaman (s)');
25 - ylabel('Genlik');
26 - title('PAM Modöle Edilmiş Sinyal');
27 - grid on;
28

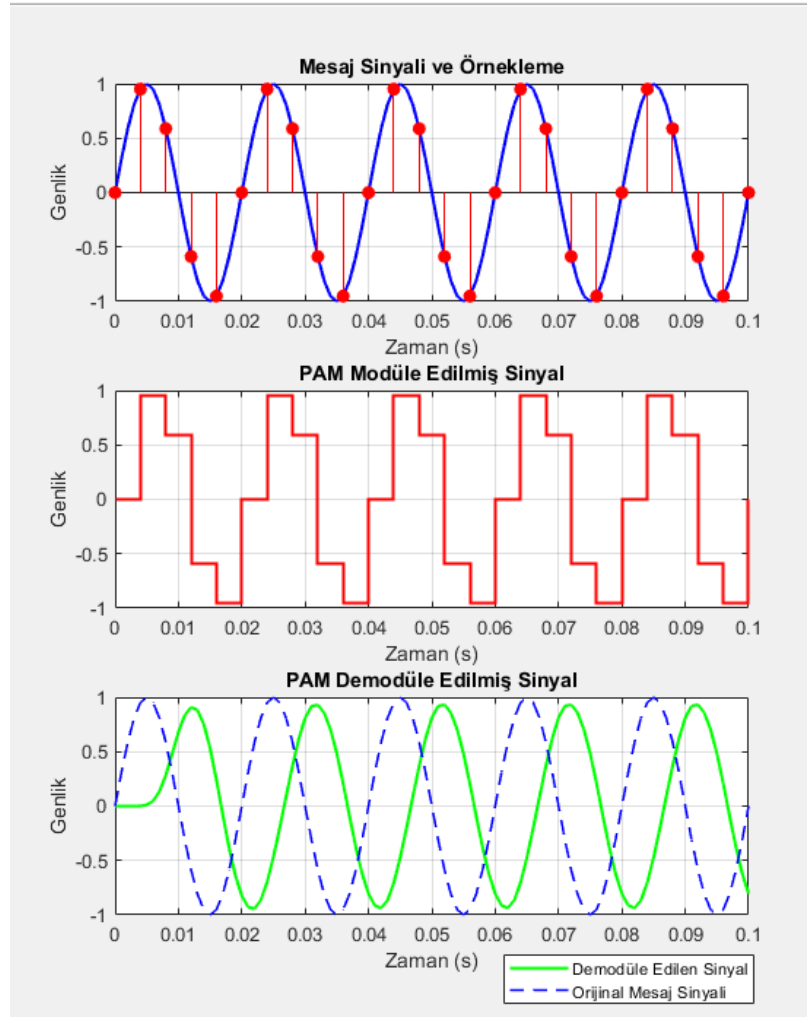
```

```

28
29 %% PAM Demodölasyonu (Alçak Geçiren Filtreleme)
30 - fc = 100; % Kesim frekansı (Mesaj sinyaline uygun şekilde belirlenir)
31 - [b, a] = butter(5, fc/(fs/2)); % 5. Dereceden Butterworth filtresi
32 - demod_signal = filter(b, a, interp1(n, m_n, t, 'previous', 'extrap')); % Filtreleme
33
34 % Çizimler - PAM Demodölasyonu
35 - subplot(3,1,3);
36 - plot(t, demod_signal, 'g', 'LineWidth', 1.5);
37 - hold on;
38 - plot(t, m, 'b--', 'LineWidth', 1.2); % Orijinal sinyal ile kıyaslama
39 - xlabel('Zaman (s)');
40 - ylabel('Genlik');
41 - title('PAM Demodöle Edilmiş Sinyal');
42 - legend('Demodöle Edilen Sinyal', 'Orijinal Mesaj Sinyali');
43 - grid on;
44
45 - disp('PAM Modölasyonu ve Demodölasyonu Tamamlandı.');
```

PAM modölatörü ve demodölatörü

➤ PAM modölasyonu ve demodölasyonu



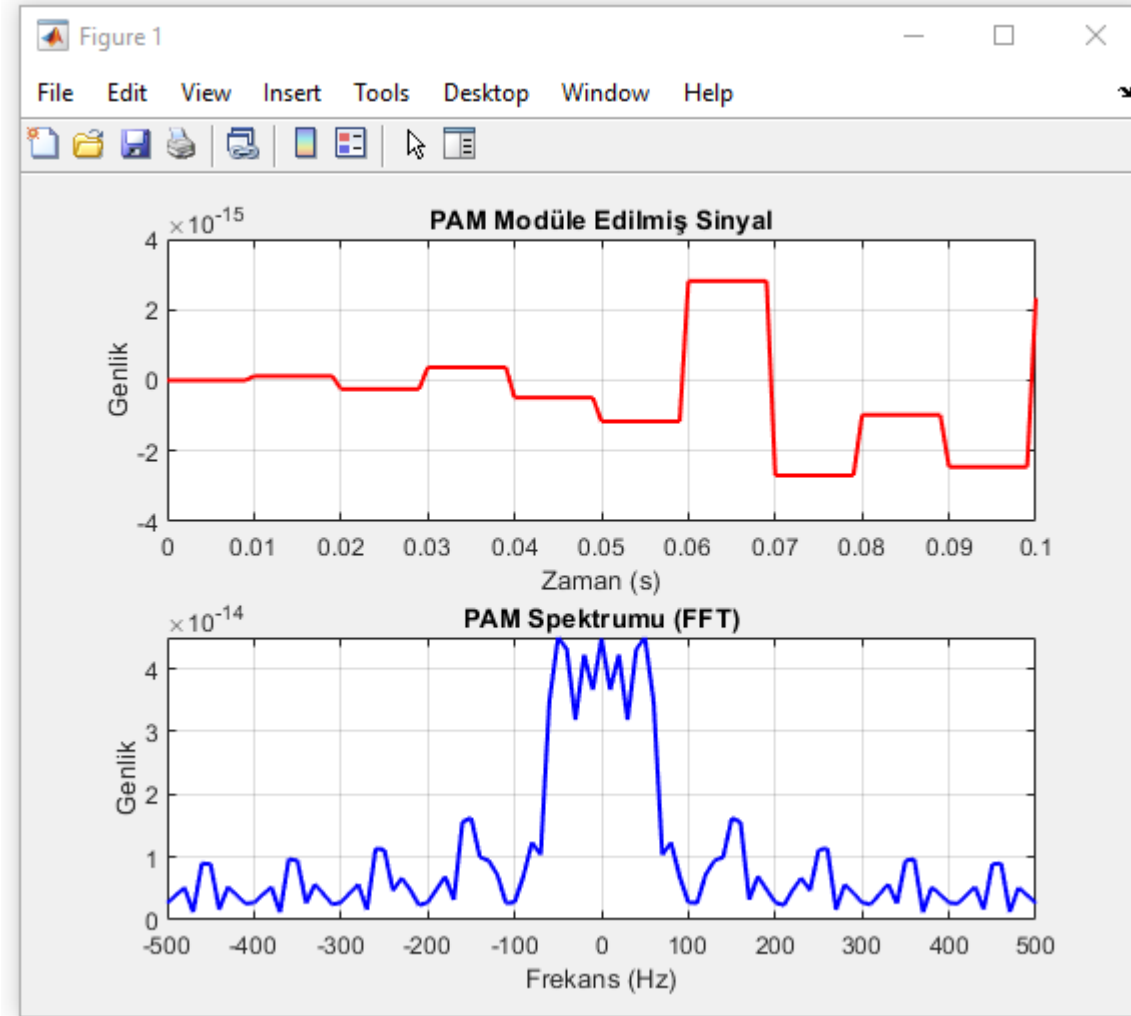
PAM modülatörü ve demodülatörü

PAM Spektrum Analizi

```

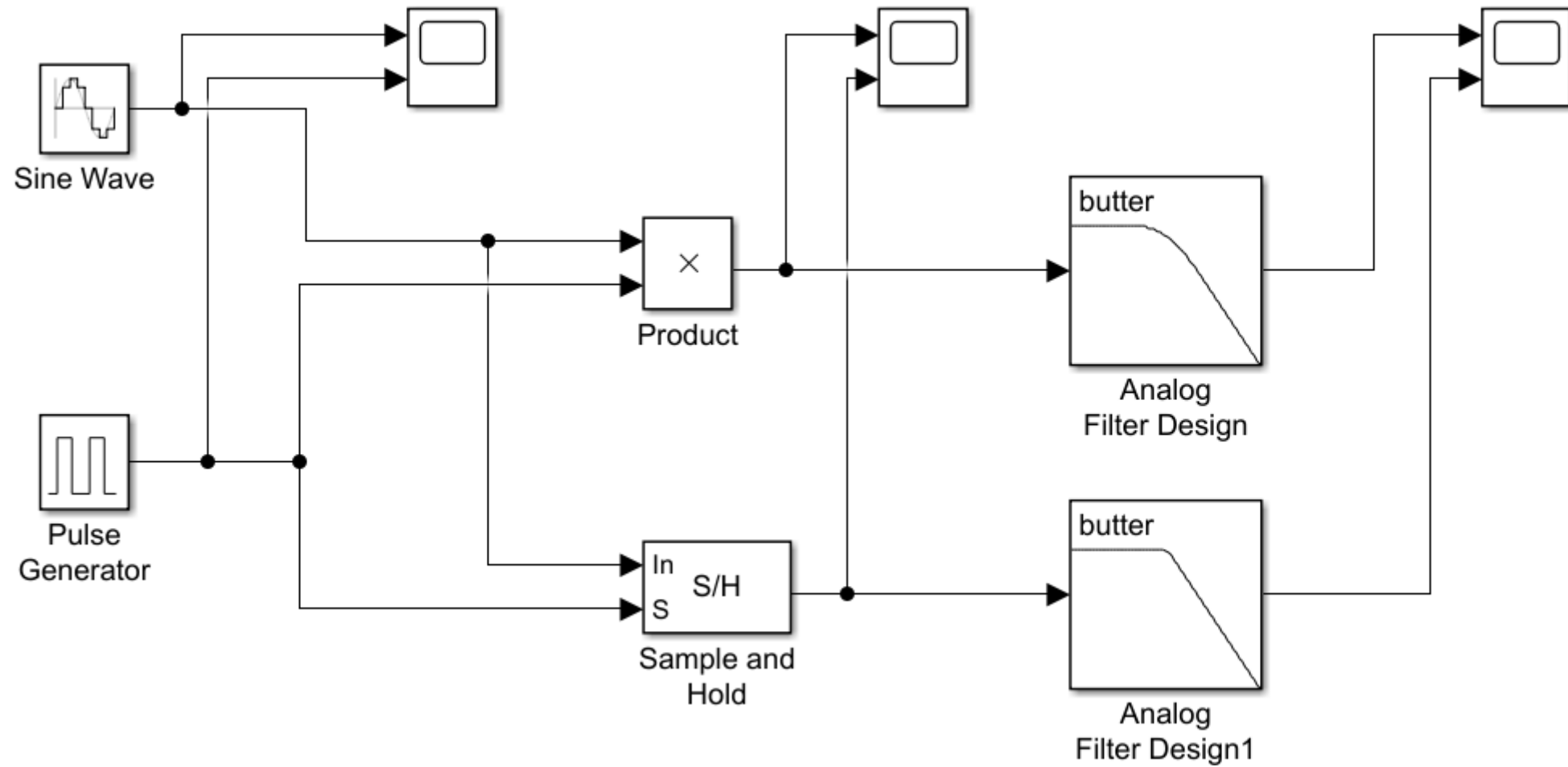
1 - clc; clear; close all;
2 -
3 - fs = 1000; % Örneklem frekansı
4 - t = 0:1/fs:0.1;
5 - m = sin(2*pi*50*t); % Mesaj sinyali
6 -
7 - % PAM Modülasyonu
8 - Ts = 1/100;
9 - n = 0:Ts:max(t);
10 - m_n = sin(2*pi*50*n);
11 -
12 - pam_signal = zeros(size(t));
13 - for i = 1:length(n)
14 -     index = find(t >= n(i), 1);
15 -     pam_signal(index:end) = m_n(i);
16 - end
17 -
18 - % FFT Analizi
19 - N = length(pam_signal);
20 - frequencies = linspace(-fs/2, fs/2, N);
21 - spectrum = fftshift(abs(fft(pam_signal)));
22 -
23 - % Grafikler
24 - figure;
25 - subplot(2,1,1);
26 - plot(t, pam_signal, 'r', 'LineWidth',1.5);
27 - xlabel('Zaman (s)');
28 - ylabel('Genlik');
29 - title('PAM Modüle Edilmiş Sinyal');
30 - grid on;
31 -
32 - subplot(2,1,2);
33 - plot(frequencies, spectrum, 'b', 'LineWidth',1.5);
34 - xlabel('Frekans (Hz)');
35 - ylabel('Genlik');
36 - title('PAM Spektrumu (FFT)');
37 - grid on;

```



PAM modülatörü ve demodülatörü

➤ PAM modülasyonu MATLAB simulink analizi



PAM modölatörü ve demodölatörü

► PAM modölatyonu MATLAB simulink analizi

Block Parameters: Sine Wave

Sine Wave

Output a sine wave:

$$O(t) = \text{Amp} \cdot \sin(\text{Freq} \cdot t + \text{Phase}) + \text{Bias}$$

Sine type determines the computational technique used. The parameters in the two types are related through:

$$\text{Samples per period} = 2 \cdot \pi / (\text{Frequency} \cdot \text{Sample time})$$

$$\text{Number of offset samples} = \text{Phase} \cdot \text{Samples per period} / (2 \cdot \pi)$$

Use the sample-based sine type if numerical problems due to running for large times (e.g. overflow in absolute time) occur.

Parameters

Sine type: **Time based**

Time (t): **Use simulation time**

Amplitude: **1**

Bias: **0**

Frequency (rad/sec): **$2 \cdot \pi \cdot 10$**

Phase (rad): **0**

Sample time: **0.001**

☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Pulse Generator

Pulse Generator

Output pulses:

```
if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on
    Y(t) = Amplitude
else
    Y(t) = 0
end
```

Pulse type determines the computational technique used.

Time-based is recommended for use with a variable step solver, while Sample-based is recommended for use with a fixed step solver or within a discrete portion of a model using a variable step solver.

Parameters

Pulse type: **Time based**

Time (t): **Use simulation time**

Amplitude: **1**

Period (secs): **0.02**

Pulse Width (% of period): **50**

Phase delay (secs): **0**

☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Sample and Hold

Sample and Hold (mask) (link)

Sample and hold input signal.

The output follows input 1 (In) as long as input 2 (S) is TRUE (1). The output is held when input 2 becomes FALSE (0).

Parameters

Initial condition: **0**

Sample time: **0.001**

OK Cancel Help Apply

PAM modülatörü ve demodülatörü

➤ PAM modülasyonu MATLAB simulink analizi

Block Parameters: Analog Filter Design

Analog Filter Design (mask) (link)

Design one of several standard analog filters, implemented in state-space form.

Parameters

Design method: Butterworth

Filter type: Lowpass

Filter order: 2

Passband edge frequency (rad/s): $2\pi \cdot 10$

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Analog Filter Design1

Analog Filter Design (mask) (link)

Design one of several standard analog filters, implemented in state-space form.

Parameters

Design method: Butterworth

Filter type: Lowpass

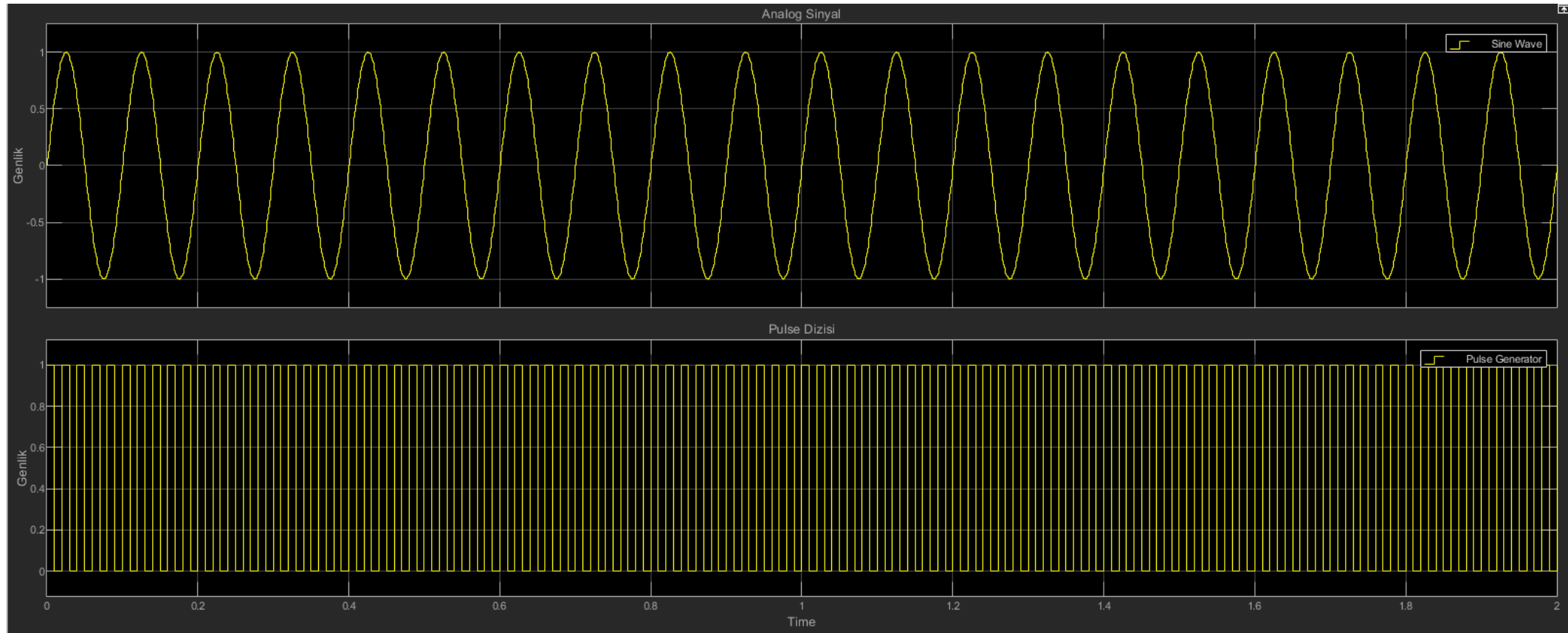
Filter order: 7

Passband edge frequency (rad/s): $2\pi \cdot 10$

OK Cancel Help Apply

PAM modölatörü ve demodölatörü

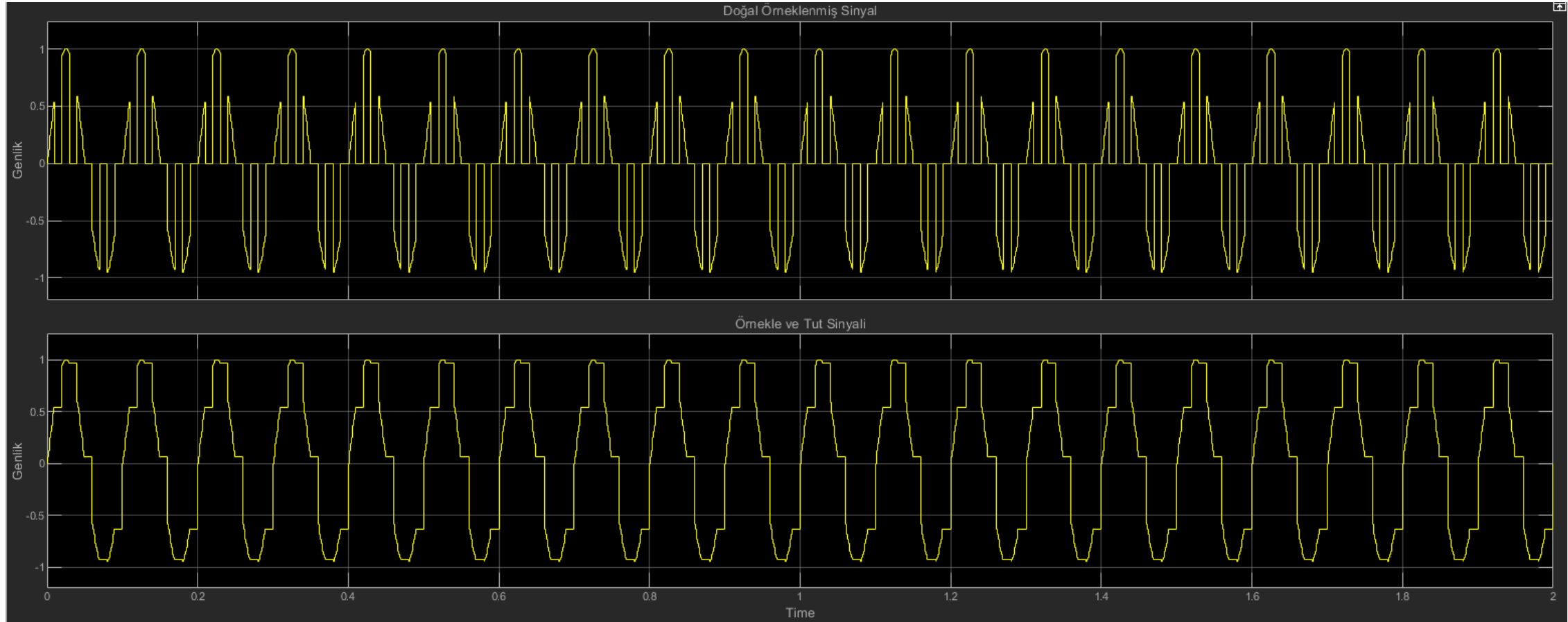
➤ PAM modölasyonu MATLAB simulink analizi



Scope 1

PAM modölatörü ve demodölatörü

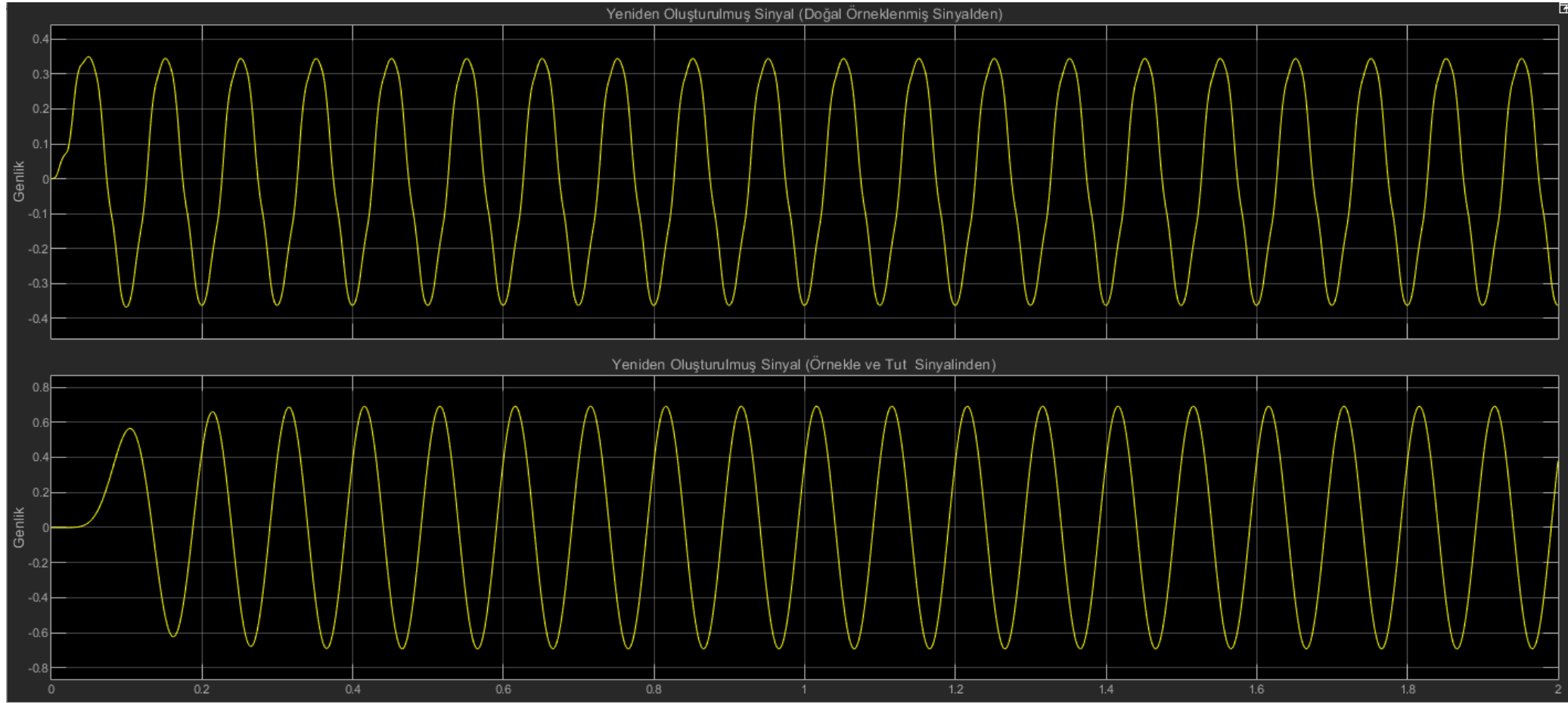
➤ PAM modölasyonu MATLAB simulink analizi



Scope 2

PAM modölatörü ve demodölatörü

➤ PAM modölasyonu MATLAB simulink analizi



Scope 3