



Dr. Sadık YILDIZ

sadikyildiz06@gmail.com

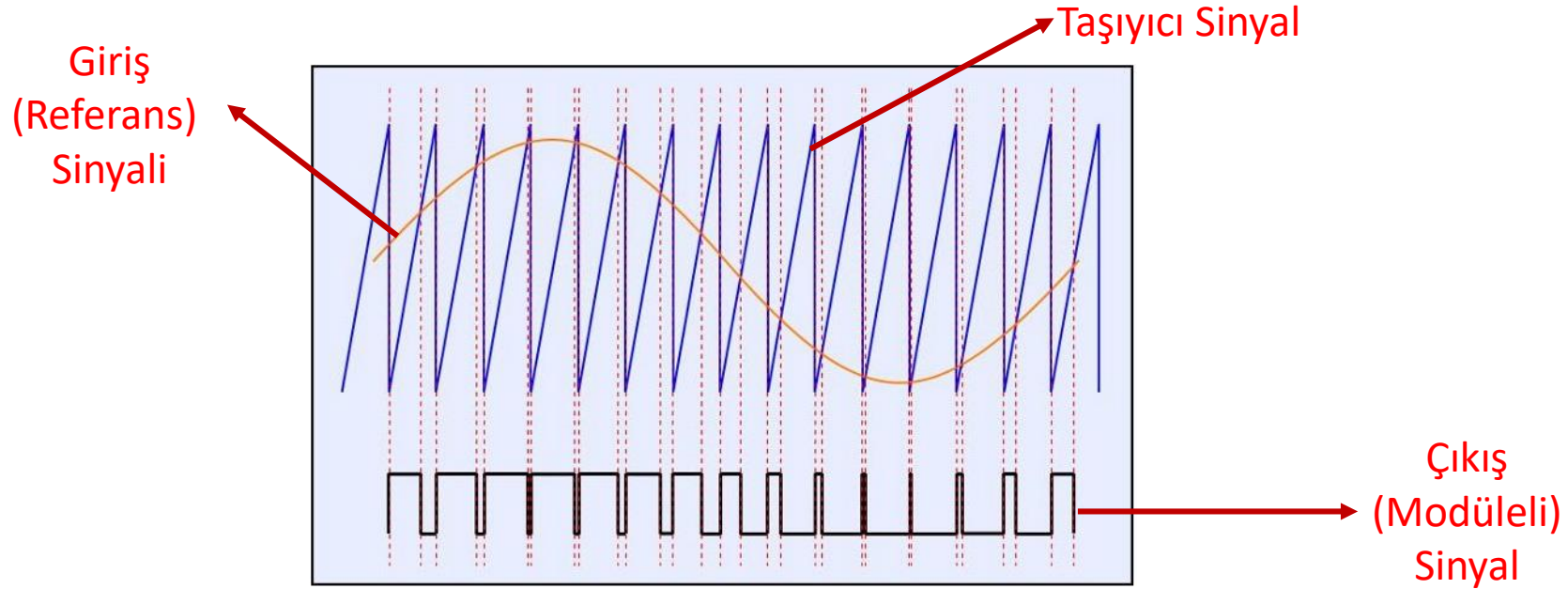
**Gazi Üniversitesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği
(Teknoloji Fakültesi)**

2025– ANKARA

PWM Modölatörü ve Demodölatörü

➤ 1. PWM (Darbe Genişlik Modölasyonu) Nedir?

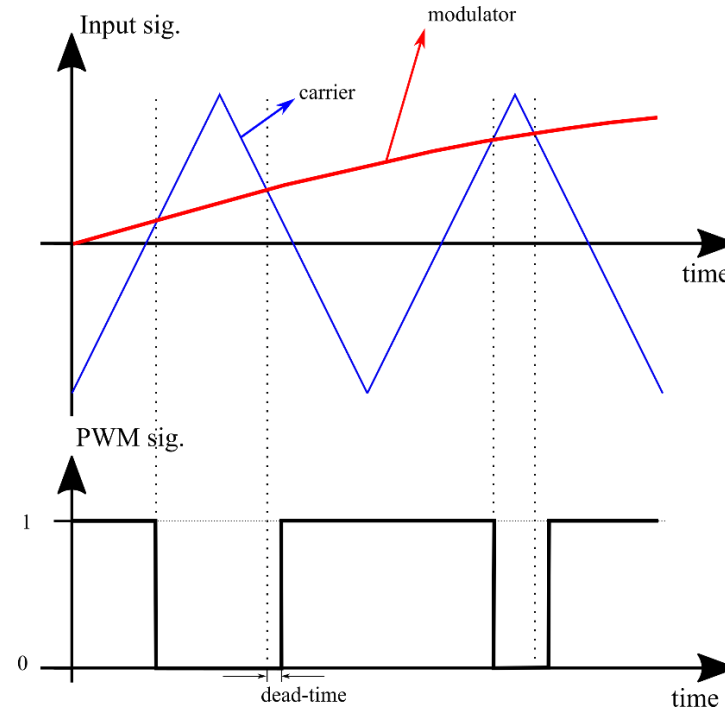
- PWM, bir analog sinyalin darbe genişlikleri ile temsil edilmesini sağlayan bir modölasyon tekniğidir.
- Analog sinyalin genliğine bağılı olarak üretilen darbelerin genişliği değışir.
- Böylece bilgi, darbe süresiyle kodlanmış olur.
- PWM, güç elektroniğı, motor kontrolü, ses işleme ve sayısal haberleşme gibi birçok alanda kullanılır.



PWM Modölatörü ve Demodölatörü

2. PWM Modölasyonu

- PWM modölasyonu, bir taşıyıcı dalğanın kare dalğanın darbe genişliğini, giriş sinyalinin anlık genliğine göre değiştiren bir süreçtir.



PWM Modülatörü ve Demodülatörü

2. PWM Modülasyonu

PWM Modülatörü Çalışma Prensibi

- Giriş sinyali ($x(t)$), bir üçgen dalga ($v_c(t)$) veya testere dişi dalga ile karşılaştırılır.
- Karşılaştırma sonucunda, giriş sinyalinin genliği büyükse, üretilen darbenin genişliği artar; küçükse, darbe genişliği azalır.
- Çıkış sinyali, dikdörtgen dalga (PWM sinyali) şeklindedir ve darbe genişliği giriş sinyaline bağlı olarak değişir.
- PWM sinyali, aşağıdaki formüle göre oluşturulur:

$$s(t) = \begin{cases} 1 & , \quad x(t) > V_c(t) \\ 0 & , \quad x(t) \leq V_c(t) \end{cases}$$

- Burada:
 - $x(t)$: Modüle edilecek giriş sinyali (analog sinyal)
 - $V_c(t)$: Üçgen veya testere dişi taşıyıcı sinyal
 - $s(t)$: Çıkıştaki PWM dalga formu

PWM Modülatörü ve Demodülatörü

2. PWM Modülasyonu

- Genellikle **üçgen taşıyıcı sinyal** aşağıdaki gibi tanımlanır: :

$$V_c(t) = A_c \cdot tri\left(\frac{t}{T_c}\right)$$

- Burada:

- A_c : Üçgen dalganın genliği
- T_c : Üçgen dalganın periyodu
- $tri(t)$: Üçgen fonksiyonu

PWM Modülatörü ve Demodülatörü

2. 2. PWM Modülasyonu

- **Darbe genişliği (D)**, giriş sinyaline bağlı olarak şu şekilde belirlenir:

$$D = \frac{x(t) + A_c}{2A_c}$$

- Burada:
- D : Görev çevrimi (*duty cycle*) olarak bilinir ve $0 \leq D \leq 1$ arasında değişir.

PWM Modülatörü ve Demodülatörü

2. PWM Modülasyonu

➤ PWM dalga formunun Fourier serisi gösterimi:

$$s(t) = \frac{D}{T_C} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin(n\pi D) \cos(n\omega_c t)$$

➤ Burada:

- $\omega_C = \frac{2\pi}{T_C}$ Taşıyıcı Açısal Frekans
- Bu ifade, PWM sinyalinin temel bileşenlerini gösterir. Genişliği değişen darbe dizisinin frekans içeriği, modüle edilen sinyale bağlıdır.

PWM Modülatörü ve Demodülatörü

3. PWM Demodülatörü Çalışma Prensibi

- PWM demodülasyonu, modüle edilen sinyali tekrar analog forma dönüştürme işlemidir.
- En yaygın kullanılan iki PWM demodülasyon yöntemi şunlardır:
 - Düşük Geçiren Filtre (LPF) ile Demodülasyon
 - Entegre (İntegral) Yöntemi ile Demodülasyon

PWM Modülatörü ve Demodülatörü

3.1. Düşük Geçiren Filtre (LPF) ile PWM Demodülasyonu

- PWM sinyali, yüksek frekans bileşenleri içeren bir dikdörtgen dalga olduğundan, bir düşük geçiren filtre kullanılarak temel bileşen (DC bileşen) ayrıştırılır.

Matematiksel Gösterim:

PWM sinyalinin ortalama bileşeni;

$$x_{demod}(t) = \frac{2A_c}{T_c} \int_0^{T_c} s(t) dt$$

- Burada:

- $x_{demod}(t)$: Elde edilen Analog Sinyal
- Düşük geçiren filtre kullanılarak, yüksek frekans harmonikleri bastırılır ve giriş sinyaline yakın bir çıkış sinyali elde edilir.

- Entegrasyon işlemi, giriş sinyalini geri kazandırır.

PWM Modülatörü ve Demodülatörü



3.2. Entegral Yöntemi ile PWM Demodülasyonu

- Bu yöntemde PWM sinyali bir entegratör devresinden geçirilir ve ortalama değeri belirlenerek giriş sinyali geri kazanılır.

$$x_{demod}(t) = k \int_0^t s(\tau) d\tau$$

- Burada:
 - k : Entegrasyon katsayısıdır.
 - Entegrasyon işlemi, giriş sinyalini geri kazandırır.

- Entegrasyon işlemi, giriş sinyalini geri kazandırır.

PWM Modülatörü ve Demodülatörü



4. PWM Modülatörü ve Demodülatörü için Devre Yapıları

4.1. PWM Modülatörü Devresi

- **Giriş sinyali kaynağı** (analog sinyal)
- **Üçgen dalga üretici** (operasyonel yükselteç ile oluşturulabilir)
- **Karşılaştırmacı (Komparatör) devresi** (operasyonel yükselteç veya dijital karşılaştırmacı ile)
- **Çıkış sinyali** (PWM darbe dizisi)

4.2. PWM Demodülatörü Devresi

- **Diyot ve RC Düşük Geçiren Filtre** (darbe genişliğine göre ortalama değer belirlenir)
- **Entegratör Devresi** (operasyonel yükselteç ile giriş sinyaline yakın bir sinyal üretilir)

PWM Modülatörü ve Demodülatörü

5. PWM Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları:

- ✓ Gürültüye karşı dayanıklıdır.
- ✓ Dijital devrelerle kolayca üretilebilir.
- ✓ Güç elektroniğinde verimli bir yöntemdir.

Dezavantajları:

- ✗ Yüksek frekanslı bileşenler filtrelenmezse bozulma olabilir.
- ✗ Faz kayması nedeniyle hata oluşabilir.

PWM Modölatörü ve Demodölatörü

5. PWM modölasyonu ve demodölasyonu

```

1  %% BAŞLANGIÇ PARAMETRELERİ
2  -  clc; clear; close all;
3  -  fs = 30; % Taşıyıcı (üçgen/sawtooth) sinyalinin frekansı (Hz)
4  -  fm = 3; % Mesaj (bilgi) sinyalinin frekansı (Hz)
5  -  sampling_frequency = 10e3; % Örnekleme frekansı (10 kHz)
6  -  a = 0.5; % Genlik
7  -  t = 0:(1/sampling_frequency):1; % 1 saniye boyunca örnekleme
8
9  %%
10 - %Taşıyıcı (Sawtooth) ve Mesaj (Sinüzoidal) Sinyallerinin Oluşturulması
11 - sawtooth = 2 * a .* sawtooth(2 * pi * fs * t); % Üçgen taşıyıcı sinyali
12 - subplot(4,1,1);
13 - plot(t, sawtooth); % Taşıyıcı sinyali çizdirme
14 - title('Comparator Wave');
15
16 - msg = a .* sin(2 * pi * fm * t); % Sinüzoidal mesaj sinyali
17 - subplot(4,1,2);
18 - plot(t, msg); % Mesaj sinyalini çizdirme
19 - title('Message Signal');
20
21 %%
22 - %PWM Modölasyonu
23 - for i=1:length(sawtooth)
24 -     if (msg(i) >= sawtooth(i))
25 -         pwm(i) = 1; % Mesaj sinyali taşıyıcıdan büyükse, çıkış 1 olur
26 -     else
27 -         pwm(i) = 0; % Mesaj sinyali taşıyıcıdan küçükse, çıkış 0 olur
28 -     end
29 - end
30 - subplot(4,1,3);
31 - plot(t, pwm, 'r');
32 - title('PWM');
33 - axis([0 1 0 1.1]); % PWM sinyalini net görmek için eksen sınırlarını ayarla

```

PWM Modülatörü ve Demodülatörü

5. PWM modülasyonu ve demodülasyonu

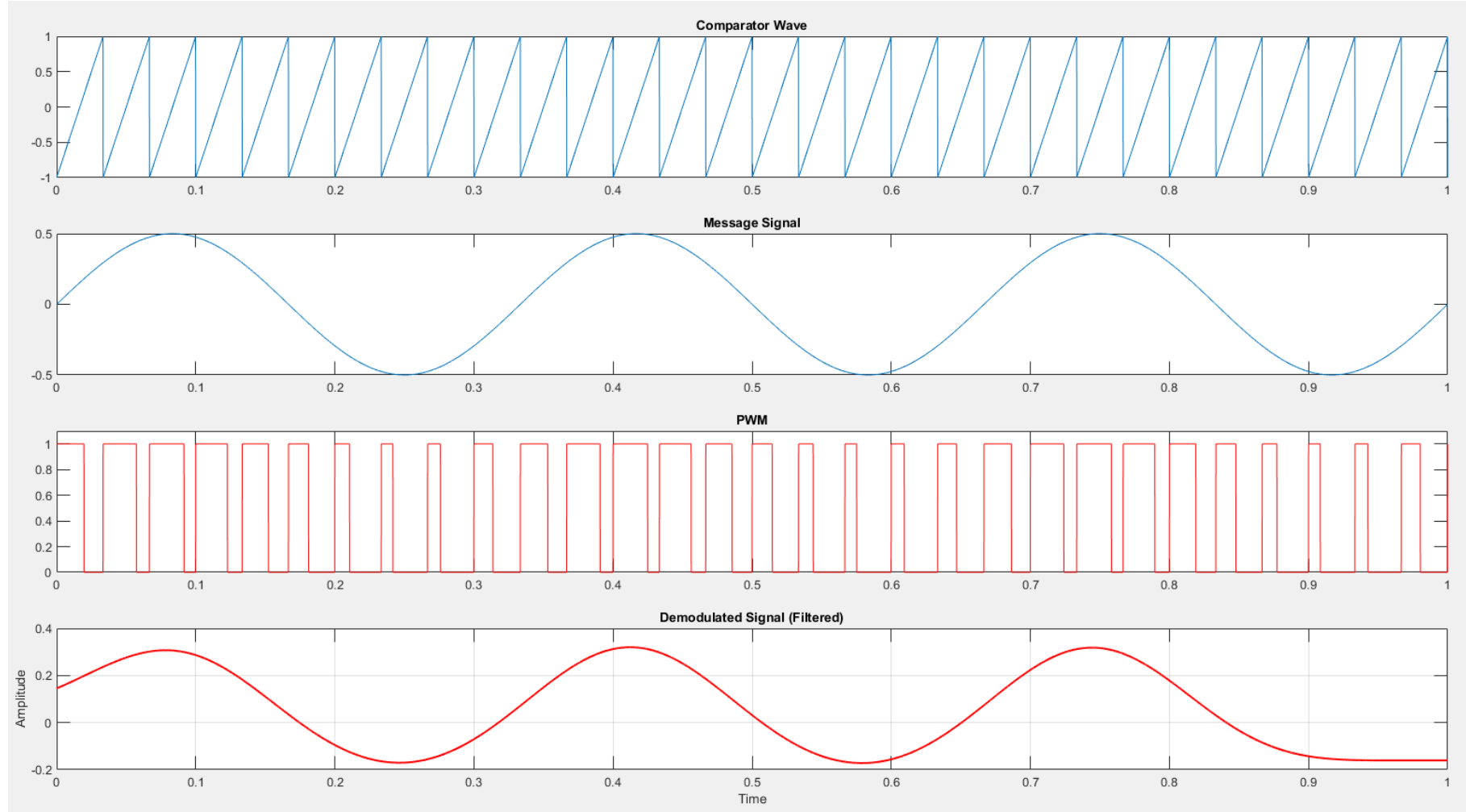
```

33
34 %%
35 %PWM Demodülasyonu (Filtreleme ile)
36 %Darbe Genişliğine Göre Sinyal Yeniden İnşası
37 demodulated_signal = zeros(size(msg));
38 for i = 1:length(pwm)-1
39     if pwm(i) == 1
40         % 1 olduğu süreyi ölç
41         j = i + 1;
42         while pwm(j) == 1 && j < length(pwm)
43             j = j + 1;
44         end
45         % Ortalama genişliğe göre analog değeri oluştur
46         demodulated_signal(i) = mean(msg(i:j-1));
47     end
48 end
49 %%
50 %PWM Demodülasyonu (Filtreleme ile)
51 %Alçak Geçiren Filtre Kullanımı
52 Fs = 1/(t(2) - t(1)); % Örneklem frekansı
53 Fc = 5; % Kesim frekansı (Hz)
54 [b, a] = butter(4, Fc / (Fs/2), 'low'); % 4. dereceden Butterworth filtresi
55 filtered_signal = filtfilt(b, a, demodulated_signal);
56
57 %%
58 %Demodüle Edilmiş Sinyalin Görselleştirilmesi
59 subplot(4,1,4);
60 plot(t, filtered_signal, 'r', 'LineWidth', 1.5);
61 title('Demodulated Signal (Filtered)');
62 xlabel('Time');
63 ylabel('Amplitude');
64 grid on;

```

PWM Modulatoru ve Demodulatoru

5. PWM modülasyonu ve demodülasyonu



PWM Modülatörü ve Demodülatörü

5. PWM modülasyonu ve demodülasyonu

```
%% BAŞLANGIÇ PARAMETRELERİ
clc; clear; close all;
fs = 30; % Taşıyıcı (üçgen/sawtooth) sinyalinin frekansı (Hz)
fm = 3; % Mesaj (bilgi) sinyalinin frekansı (Hz)
sampling_frequency = 10e3; % Örnekleme frekansı (10 kHz)
a = 0.5; % Genlik
t = 0:(1/sampling_frequency):1; % 1 saniye boyunca örnekleme
```

Bu bölümde:

- fs ve fm, sırasıyla taşıyıcı dalganın ve mesaj sinyalinin frekanslarını belirler.
- sampling_frequency, 10 kHz olarak seçilir, böylece sinyaller yüksek doğrulukla örneklenir.
- a, sinyallerin genliğini belirler.
- t, 1 saniye boyunca belirli aralıklarla örneklenen zaman vektörünü oluşturur.

PWM Modülatörü ve Demodülatörü

5. PWM modülasyonu ve demodülasyonu

```
%Taşıyıcı (Sawtooth) ve Mesaj (Sinüzoidal) Sinyallerinin Oluşturulması
sawtooth = 2 * a .* sawtooth(2 * pi * fs * t); % Üçgen taşıyıcı sinyali
subplot(4,1,1);
plot(t, sawtooth); % Taşıyıcı sinyali çizdirme
title('Comparator Wave');

msg = a .* sin(2 * pi * fm * t); % Sinüzoidal mesaj sinyali
subplot(4,1,2);
plot(t, msg); % Mesaj sinyalini çizdirme
title('Message Signal');
```

Bu bölümde:

- sawtooth() fonksiyonu kullanılarak üçgen taşıyıcı dalga üretilir.
- sin() fonksiyonu ile sinüzoidal mesaj sinyali oluşturulur.
- subplot kullanılarak her iki sinyal de ayrı grafiklerde çizdirilir.

PWM Modülatörü ve Demodülatörü

5. PWM modülasyonu ve demodülasyonu

```
%PWM Modülasyonu
for i=1:length(sawtooth)
    if (msg(i) >= sawtooth(i))
        pwm(i) = 1; % Mesaj sinyali taşıyıcıdan büyükse, çıkış 1 olur
    else
        pwm(i) = 0; % Mesaj sinyali taşıyıcıdan küçükse, çıkış 0 olur
    end
end
subplot(4,1,3);
plot(t, pwm, 'r');
title('PWM');
axis([0 1 0 1.1]); % PWM sinyalini net görmek için eksen sınırlarını ayarla
```

Bu bölümde:

- PWM sinyali oluşturmak için mesaj sinyali ile üçgen taşıyıcı sinyal karşılaştırılır.
- Eğer mesaj sinyali taşıyıcıdan büyükse, çıkış 1 olur; aksi halde 0 olur.
- for döngüsü her örnek için bu işlemi yaparak PWM sinyalini oluşturur.
- PWM sinyali kırmızı ('r') renkte çizdirilir.

PWM Modülatörü ve Demodülatörü

5. PWM modülasyonu ve demodülasyonu

```
%PWM Demodülasyonu (Filtreleme ile)
%Darbe Genişliğine Göre Sinyal Yeniden İnşası
demodulated_signal = zeros(size(msg));
for i = 1:length(pwm)-1
    if pwm(i) == 1
        % 1 olduğu süreyi ölç
        j = i + 1;
        while pwm(j) == 1 && j < length(pwm)
            j = j + 1;
        end
        % Ortalama genişliğe göre analog değeri oluştur
        demodulated_signal(i) = mean(msg(i:j-1));
    end
end
```

Bu bölümde:

- PWM sinyalindeki 1'lerin genişliği ölçülerek orijinal sinyalin analog değeri geri kazanılmaya çalışılır.
- Eğer bir örnekleme noktasında PWM sinyali 1 ise, o noktadan itibaren kaç örnek boyunca 1 olduğu hesaplanır.
- Darbe genişliği, orijinal sinyalin genliğini temsil ettiğinden, genişlik ölçülerek ortalama bir değer atanır.

PWM Modülatörü ve Demodülatörü

5. PWM modülasyonu ve demodülasyonu

```
%%  
%PWM Demodülasyonu (Filtreleme ile)  
%Alçak Geçiren Filtre Kullanımı  
Fs = 1/(t(2) - t(1)); % Örnekleme frekansı  
Fc = 5; % Kesim frekansı (Hz)  
[b, a] = butter(4, Fc / (Fs/2), 'low'); % 4. dereceden Butterworth filtresi  
filtered_signal = filtfilt(b, a, demodulated_signal);
```

Bu bölümde:

- PWM sinyalini düzgünleştirmek ve orijinal sinyali geri kazanmak için alçak geçiren filtre uygulanır.
- Butterworth filtresi kullanılır (4. derece).
- $F_c = 5$ Hz olarak belirlenir, çünkü mesaj sinyalinin frekansı $f_m = 3$ Hz idi.
- Filtrenin kesim frekansı, mesaj sinyalinin biraz üzerinde seçilmelidir.

PWM Modülatörü ve Demodülatörü

5. PWM modülasyonu ve demodülasyonu

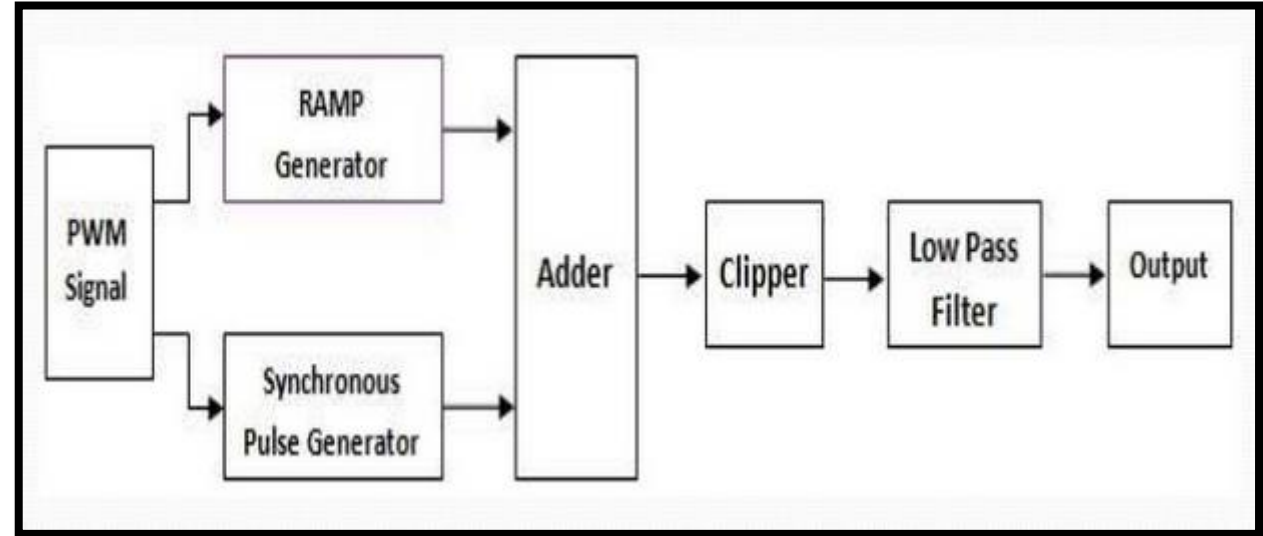
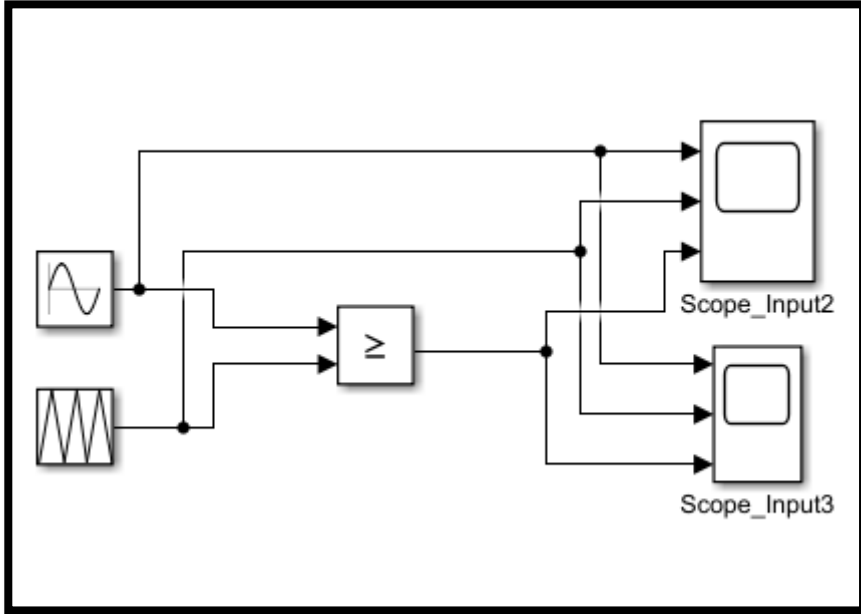
```
%%  
%Demodüle Edilmiş Sinyalin Görselleştirilmesi  
subplot(4,1,4);  
plot(t, filtered_signal, 'r', 'LineWidth', 1.5);  
title('Demodulated Signal (Filtered)');  
xlabel('Time');  
ylabel('Amplitude');  
grid on;
```

Bu bölümde:

- Filtrelenmiş demodüle edilmiş sinyal kırmızı renkte çizdirilir.
- Orijinal mesaj sinyali ile benzer bir şekil elde edilir.

PWM Modölatörü ve Demodölatörü

PWM modölatyonu ve demodölatyonu Ödevi



- Yukarıdaki diyagramlarda PWM modölatörü ve demodölatörünün blog diyagramı verilmiştir.
- Bu blog diyagramlardan faydalanarak MATLAB Simulink programında PWM modölatörü ve demodölatörünün tasarımını yaparak simölatyonunu gerçekleştiriniz.