



Dr. Sadık YILDIZ

sadikyildiz06@gmail.com

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

2025– ANKARA

PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

1. PCM Modülasyonu

- PCM modülasyonu, üç ana adımdan oluşur:
 1. Örnekleme (Sampling)
 2. Kuantalama (Quantization)
 3. Kodlama (Encoding)

PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

1.1 Örneklemeye (Sampling)

Örneklemeye işlemi, analog sinyalin belirli zaman aralıklarında genlik değerlerinin alınmasıdır. Örneklemeye işleminin temel kuralı Nyquist Teoremi'dir. Bu teorem, kayıpsız örneklemeye için örneklemeye frekansının en az sinyalin en yüksek frekansının iki katı olması gerektiğini belirtir.

$$f_s \geq 2f_{max}$$

Burada:

f_s = Örneklemeye frekansı

f_{max} = Analog sinyalin maksimum frekansı

Örneklemeye, ideal dürtü örnekleme, doğal örnekleme, düs tepeli örnekleme gibi yöntemlerle yapılabilir.

PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

1.2 Kuantalama (Quantization)

Örneklenen sinyalin genlik değerleri belirli seviyelere yuvarlanarak sayısal hale getirilir. Analog sinyal sürekli bir değerler kümesine sahipken, dijital sinyal yalnızca belirli genlik seviyeleriyle ifade edilebilir. Kuantalama hatası, sinyalin gerçek değerleri ile kuantalanmış değerleri arasındaki farktan kaynaklanır ve aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$Q_e = \frac{\Delta}{2}$$

Burada:

Δ = Kuantalama adım genişliği (Kuantalama seviyeleri arasındaki fark)

Kuantalama iki şekilde yapılabilir:

- Uniform (Eşit Adımlı) Kuantalama: Sabit aralıklarla kuantalanır.
- Non-uniform (Eşit Olmayan) Kuantalama: Özellikle ses sinyalleri için, düşük genlikli sinyallerde daha hassas bir kuantalama yapılır. μ -law ve A-law gibi teknikler kullanılır.
- Kuantalama sonucu, her örnek belirli bir dijital değere yuvarlanır.

PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

1.3 Kodlama (Encoding)

- Kuantalama işlemi tamamlandıktan sonra, her kuantalanmış değer, belirli bir bit dizisi ile temsil edilir. Eğer L farklı kuantalama seviyesi varsa, gerekli bit sayısı şu formülle hesaplanır:

$$N = \log_2 L$$

- Örneğin, 8 bitlik bir PCM sistemi kullanılıyorsa, toplam $2^8 = 256$ farklı kuantalama seviyesi bulunur.
- Kodlama genellikle Binary (İkili) veya Gray Kod gibi yöntemlerle yapılır.

PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

2. PCM Demodülasyonu

- PCM demodülasyonu, modülasyon sürecinin tersidir. Dijital olarak kodlanmış sinyal, tekrar analog sinyale dönüştürülür.
- Demodülasyon işlemi üç temel adımdan oluşur:
 1. Kod Çözme (Decoding)
 2. Genlik Dönüştürme (Reconstruction)
 3. Filtreleme (Low-Pass Filtering)

PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

2.1 Kod Çözme (Decoding)

- Gelen dijital sinyal, önceden belirlenmiş kodlama şeması kullanılarak kuantalama seviyelerine çevrilir.
- Örneğin, 8-bit kodlanmış bir PCM sinyali alındığında, her 8-bitlik veri paketi bir kuantalama seviyesiyle eşleştirilerek çözülür.

2.2 Genlik Dönüştürme (Reconstruction)

- Kuantalama seviyelerine geri dönüştürülen sinyal, hala basamaklı (stepwise) bir yapıdadır.
- Bu nedenle, orijinal sinyale daha yakın bir hale getirilmesi için birleştirme işlemi uygulanır.

2.3 Filtreleme (Low-Pass Filtering)

- Son olarak, genliği yeniden oluşturulmuş ancak hala basamaklı görünen sinyal, alçak geçiren filtre (Low Pass Filter - LPF) ile düzeltilerek orijinal analog sinyale mümkün olduğunca yaklaştırılır.
- Filtrenin kesim frekansı Nyquist frekansı (örnekleme frekansının yarısı) olarak belirlenir.

PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

3. PCM'in Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları:

- ✓ Yüksek kaliteli dijital ses iletimi sağlar.
- ✓ Gürültüye karşı dayanıklıdır (Analog sinyallerde olduğu gibi bozulmalar birikmez).
- ✓ Sıkıştırma ve hata düzeltme teknikleri ile daha verimli hale getirilebilir.
- ✓ Sayısal sistemlerle uyumlu olduğu için işlem ve saklama kolaydır.

Dezavantajları:

- ✗ Büyük bant genişliği gerektirir.
- ✗ Kuantalama hatası oluşabilir.
- ✗ Örnekleme ve kuantalama nedeniyle sinyalin belirli bir hassasiyet kaybı olabilir.

PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

3. MATLAB Uygulaması

```
1 - clc;
2 - clear;
3 - close all;
4
5 %% 1. Analog Sinyal Oluşturma
6 - fs = 8000; % Örnekleme frekansı (Hz)
7 - t = 0:1/fs:0.02; % 20 ms zaman aralığı
8 - f = 1000; % Sinyal frekansı (Hz)
9 - analog_signal = sin(2*pi*f*t); % Analog sinyal (sinüs dalgası)
10
11 %% 2. Örnekleme (Sampling)
12 - Ts = 1/fs; % Örnekleme periyodu
13 - sampled_times = 0:Ts:0.02; % Örnekleme noktaları
14 - sampled_signal = sin(2*pi*f*sampled_times); % Örneklenmiş sinyal
15
16 %% 3. Kuantalama (Quantization)
17 - bit_depth = 3; % 3-bit kuantalama
18 - L = 2^bit_depth; % Kuantalama seviyeleri
19 - max_val = max(sampled_signal);
20 - min_val = min(sampled_signal);
21 - quant_levels = linspace(min_val, max_val, L); % Kuantalama seviyeleri
22 - quantized_signal = zeros(size(sampled_signal));
23
```

PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

3. MATLAB Uygulaması

```
24 % Kuantalama işlemi (en yakın seviyeye yuvarlama)
25 - for i = 1:length(sampled_signal)
26 -     [~, index] = min(abs(sampled_signal(i) - quant_levels)); % En yakın kuantalama seviyesini bul
27 -     quantized_signal(i) = quant_levels(index);
28 - end
29
30 %% 4. PCM Kodlama (Binary Kodlama)
31 - encoded_signal = de2bi((quantized_signal - min_val) / (max_val - min_val) * (L - 1), bit_depth, 'left-msb');
32
33 %% 5. PCM Kodlarını Excel Dosyasına Yazma
34 - filename = 'PCM_Kodlama.xlsx';
35 - encoded_str = string(encoded_signal); % Binary veriyi string olarak formatla
36 - binary_strings = join(encoded_str, ''); % Satır bazlı binary kodları birleştir
37
38 % Excel'e yazdırılacak veri
39 - data = table(sampled_times(:), sampled_signal(:), quantized_signal(:), binary_strings(:), ...
40 -     'VariableNames', {'Zaman (s)', 'Örnekleilmiş Sinyal', 'Kuantalı Sinyal', 'PCM Kodu'});
41
42 - writetable(data, filename); % Excel dosyasına kaydetme
43 - disp(['PCM kodları "', filename, '" olarak kaydedildi.']);
44
```

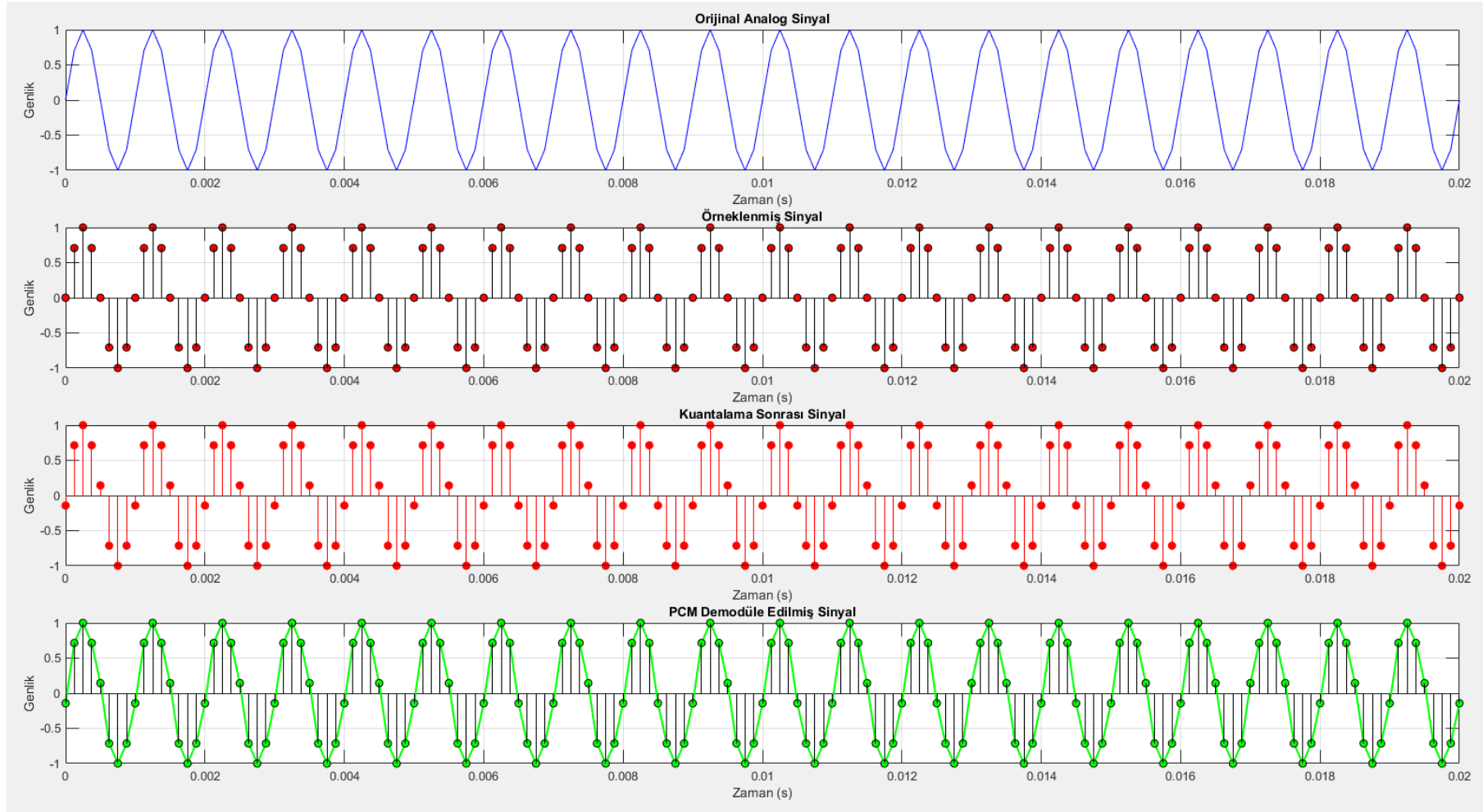
PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

3. MATLAB Uygulaması

```
45 %% 6. Sonuçları Görselleştirme
46 figure;
47
48 % 1. Orijinal Analog Sinyal
49 subplot(4,1,1);
50 plot(t, analog_signal, 'b'); grid on; hold on;
51 title('Orijinal Analog Sinyal');
52 xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik');
53
54 % 2. Örneklenmiş Sinyal
55 subplot(4,1,2);
56 stem(sampled_times, sampled_signal, 'ko', 'MarkerFaceColor', 'r'); grid on;
57 title('Örneklenmiş Sinyal');
58 xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik');
59
60 % 3. Kuantalama Sonrası Sinyal
61 subplot(4,1,3);
62 stem(sampled_times, quantized_signal, 'ro', 'MarkerFaceColor', 'r'); grid on;
63 title('Kuantalama Sonrası Sinyal');
64 xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik');
65
66 % 4. PCM Demodüle Edilmiş Sinyal
67 subplot(4,1,4);
68 plot(sampled_times, quantized_signal, 'g', 'LineWidth', 1.5); grid on; hold on;
69 stem(sampled_times, quantized_signal, 'ko', 'MarkerFaceColor', 'g');
70 title('PCM Demodüle Edilmiş Sinyal');
71 xlabel('Zaman (s)'); ylabel('Genlik');
```

PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

3. MATLAB Uygulaması



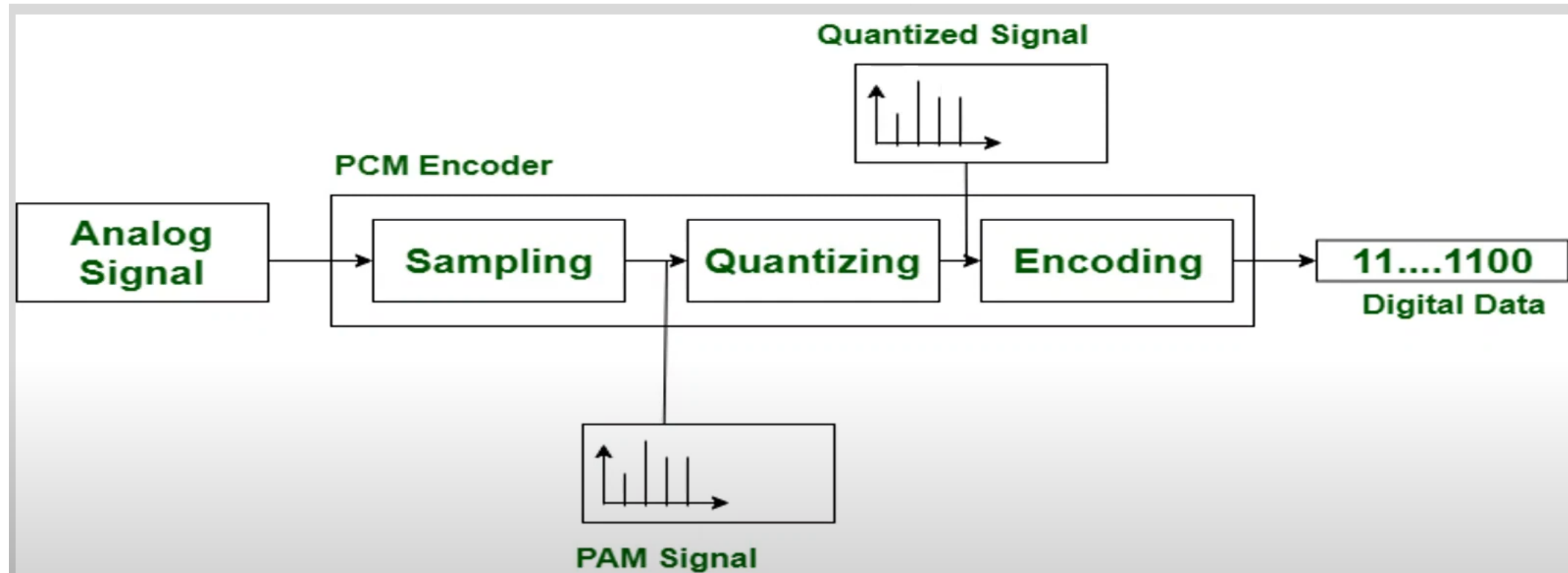
PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

3. MATLAB Uygulaması

	A	B	C	D	E
1	Zaman (s)	Örneklelenmiş Sinyal	Kuantalı Sinyal	PCM Kodu	
2	0	0	-0,142857143	011	
3	0,000125	0,707106781	0,714285714	110	
4	0,00025	1	1	111	
5	0,000375	0,707106781	0,714285714	110	
6	0,0005	1,22465E-16	0,142857143	100	
7	0,000625	-0,707106781	-0,714285714	001	
8	0,00075	-1	-1	000	
9	0,000875	-0,707106781	-0,714285714	001	
10	0,001	-2,44929E-16	-0,142857143	011	
11	0,001125	0,707106781	0,714285714	110	
12	0,00125	1	1	111	
13	0,001375	0,707106781	0,714285714	110	
14	0,0015	3,67394E-16	0,142857143	100	

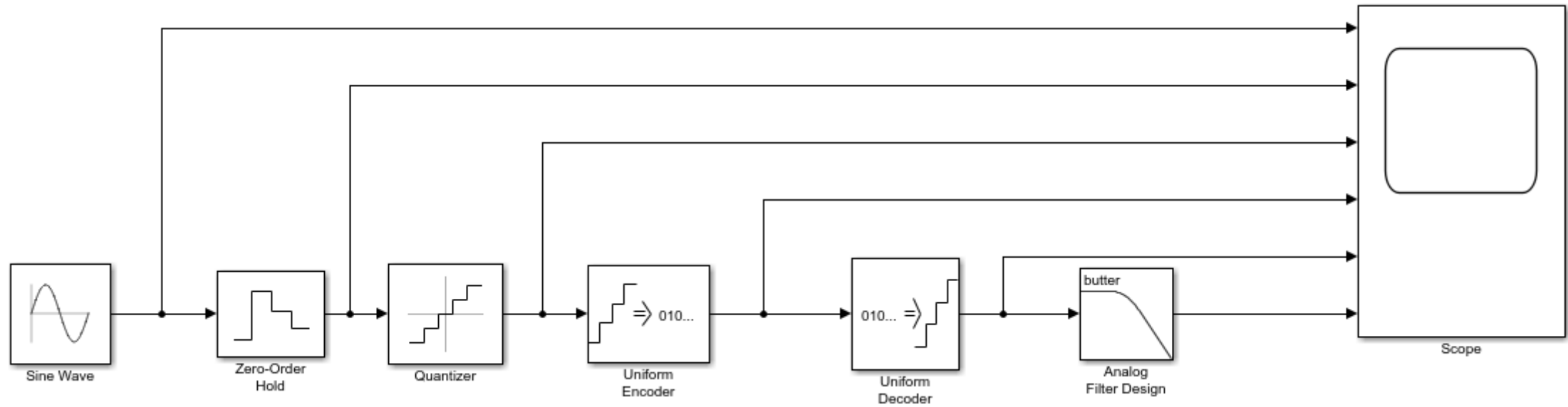
PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

4. MATLAB Simulink Uygulaması



PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

4. MATLAB Simulink Uygulaması



PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

4. MATLAB Simulink Uygulaması

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:

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

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): 1

Phase (rad): 0

Sample time: 0

☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Zero-Order Hold

Zero-Order Hold

Zero-order hold.

Parameters

Sample time (-1 for inherited): -1

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Quantizer

Quantizer

Discretize input at given interval.

Parameters

Quantization interval: 0.1

☒ Treat as gain when linearizing

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Uniform Encoder

Uniform Encoder (mask) (link)

Uniformly quantize and encode the input into specified number of bits. The input is saturated at positive and negative Peak value. Output datatype is either 8, 16, or 32-bit signed or unsigned integer, based on the least number of bits needed.

Parameters

Peak: 1

Bits: 4

Output type: Unsigned integer

OK Cancel Help Apply

PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

4. MATLAB Simulink Uygulaması

Block Parameters: Uniform Decoder

Uniform Decoder (mask) (link)

Uniformly decode the input with positive and negative Peak value. Saturate or wrap the input in overflow. The output datatype is double or single.

Parameters

Peak: 1

Bits: 4

Overflow mode: Saturate

Output type: Double

OK Cancel Help Apply

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): 5

OK Cancel Help Apply

PCM (Pulse Code Modulation) Modülasyonu ve Demodülasyonu

4. MATLAB Simulink Uygulaması

