

# MDDE102 Sinyal İşleme

## Analogdan Dijitale Geçiş: Örnekleme ve ADC Temelleri

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Oğuz

İstanbul Okan Üniversitesi  
Meslek Yüksekokulu  
Elektronik ve Haberleşme Teknolojisi Programı

2025-2026 Güz Dönemi

# Geçen Haftadan Hatırlatma: Sistemler

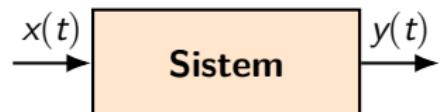
Geçen hafta, sinyalleri işleyen "Kara Kutu"lara **Sistem** dediğini öğrendik.

## Ideal Bir Sistemin Özellikleri

- **Doğrusal (Linear):** Sinyali sadece ölçekler (yükseltir/zayıflatır) veya toplar. Şeklini bozmadır. (Kırıılma/Distorsyon yapmaz).
- **Zamanla Değişmeyen (Time-Invariant):** Davranışı zamana göre değişmez. Giriş gecikirse, çıkış da sadece gecikir.

## Altın Kural: Nedensellik

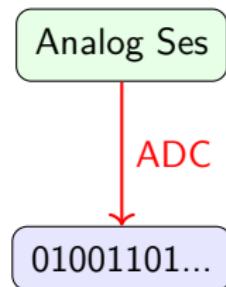
- Gerçek zamanlı sistemler **Geleceği Göremez**.
- Çıkış sadece şu anki ve geçmiş girişlere bağlıdır.



# Neden Dijitale Dönüşüm? (Haberleşme Gözüyle)

Doğadaki tüm sinyaller (ses, ısı, ışık) **Analog**dur. Neden bunları dijital (1 ve 0 değerlerine) çevirmek için bu kadar uğraşıyoruz?

- **Gürültü Bağılılığı:** Dijital sinyaller yolda bozulsa bile, alıcı 1'i ve 0'ı kolayca ayırt edip sinyali %100 temizleyebilir (Onarılabilir).
- **Sıkıştırma (Compression):** MP3, JPEG, H.264 gibi algoritmalarla veriyi küçültebiliriz. Analog yapıda bu mümkün değildir.
- **Şifreleme (Kriptografi):** Askeri ve sivil haberleşmede dijital veri kolayca şifrelenir.
- **Donanım Ucuzluğu:** Yazılımla (DSP/Mikroişlemci) karmaşık filtreler yapmak, devasa analog devreler kurmaktan çok daha ucuzdur.



# Neden Dijital? - 1: Gürültü ve İletim

Analog sinyaller mesafe arttıkça zayıflar ve gürültü ile birbirine karışır.

## Analog İletim

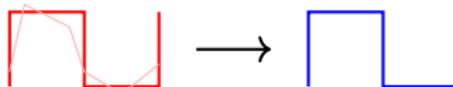
- Sinyale gürültü eklendiğinde, gürültüyü sinyalden ayırmak imkansızdır.
- Yükseltici (Amplifier), gürültüyü de yükseltir.



Gürültülü Analog

## Dijital İletim

- Sinyal sadece 1 ve 0 olduğu için, küçük bozulmalar sonucu değişmez.
- **Rejenerasyon:** Eşik değerin üzerindeyse 1, altındaysa 0 diyerek sinyal



Gürültülü Dijital

Yenilenmiş (Temiz)

## Neden Dijital? - 2: Esneklik ve Yazılım

- **Kalıcı Depolama:** Analog kasetler/plaklar zamanla aşınır ve veri kaybeder. Dijital veri (Hard disk, Bulut) teorik olarak sonsuza dek bozulmadan saklanabilir.
- **Hata Kontrolü (Error Correction):** Dijital sistemlerde, eksik gelen bir bitin yerine doğrusunu koyan akıllı algoritmalar vardır.
- **Çoklama (Multiplexing):** Tek bir fiber optik kablodan binlerce dijital ses kanalını aynı anda göndermek, analog yönteme göre çok daha kolay ve verimlidir.

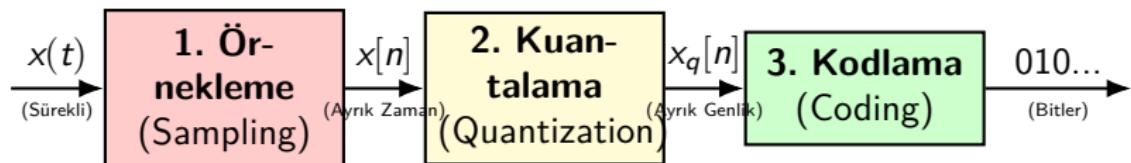
### Teknik Perspektif

Modern haberleşme sistemlerinde (5G, Wi-Fi), sinyal işleme artık devasa devre kartlarıyla değil, **mikroçipler içindeki satır satır kodlarla** yapılmaktadır. Bunun ön koşulu sinyalin sayısal olmasıdır.

**Özetle: ADC, fiziksel dünya ile bilgisayarın beyni arasındaki tek kapıdır.**

# ADC Zinciri: 3 Temel Adım

Analog-Dijital Çevirici (ADC) donanımı, temelde 3 aşamadan oluşur:



## Bu Haftanın Konusu: Örnekleme (Sampling)

Sinyali zaman ekseninde dilimleme işlemidir. "Hangi sıklıkla fotoğraflarını çekmeliyim?" sorusunun cevabıdır. (Not: Kuantalama haftaya işlenecektir).

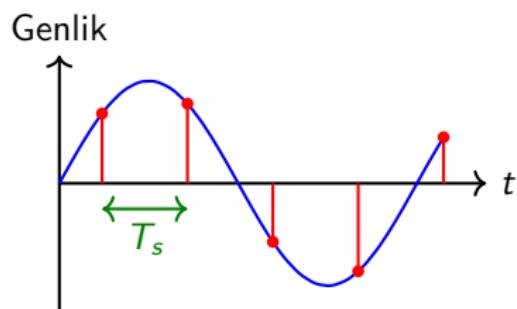
# Örnekleme (Sampling) Nedir?

**Örnekleme:** Sürekli akan zamanı ( $t$ ), belirli aralıklarla “dondurup” o andaki değeri okuma işlemidir.

## Parametreler:

- **$T_s$  (Örnekleme Periyodu):** İki okuma (fotoğraf çekme) arasındaki saniye cinsinden süredir.
- **$f_s$  (Örnekleme Frekansı):** Saniyede kaç kez örnek aldığımızdır (Hertz).

$$f_s = \frac{1}{T_s}$$



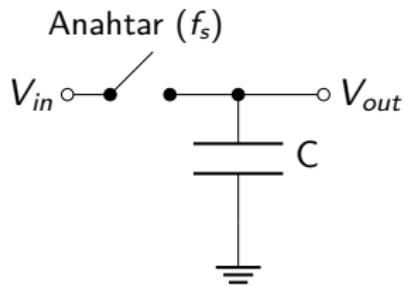
Kırmızı noktalar: Örneklenmiş dijital dizi ( $x[n]$ ).

*Örnek: Bir termometre her 2 saniyede bir odayı ölçuyorsa  $T_s = 2 \text{ sn}$ ,  $f_s = 0.5 \text{ Hz}$ 'dir.*

# Örnekleme Nasıl Yapılır? (Sample and Hold - S/H)

ADC içerisindeki en kritik devre parçası **Örnekle ve Tut (S/H)** devresidir.

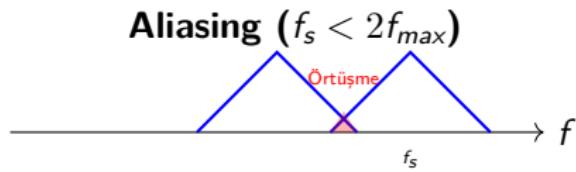
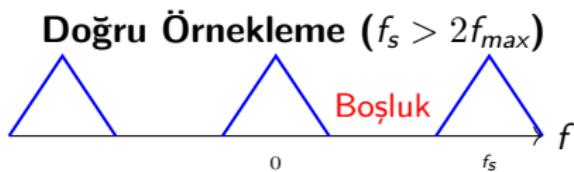
- **Anahtarlama:** Bir elektronik anahtar  $T_s$  aralıklarla çok hızlı açılıp kapanır.
- **Kondansatörün Rolü:** Anahtar kapandığında girişteki voltaj bir kondansatöre dolar.
- **Tutma (Hold):** Anahtar açıldığında, kondansatör üzerindeki voltajı bir sonraki örneğe kadar sabit tutar.



*Neden Tutuyoruz? Çünkü kuantalama (haftaya işlenecek) işlemi zaman alır; sinyalin bu sürede kırırdamaması gereklidir.*

# Frekans Gözüyle Örnekleme: Kopyalanan Spektrum

Örnekleme işlemi, sinyalin orijinal frekans paketini  $f_s$  aralıklarla sonsuza kadar sağa ve sola kopyalar.



- Kopyalar birbirine değerse (sağdaki grafik), alıcıda orijinal sinyali diğerlerinden ayıramayız.
- **Anti-Aliasing Filtresi**, bu üçgenlerin genişliğini daraltarak birbirlerine çarpmalarını engeller.

# Çok Hızlı veya Çok Yavaş Örnekleme

Soru: Örnekleme frekansını ( $f_s$ ) neye göre seçeceğiz?

## Çok Hızlı Örneklersek (Yüksek $f_s$ )

- ✓ Sinyali kusursuz yakalarız.
- ✗ Çoğu fazla veri (Mb/Gb) oluşur.  
İşlemci yorulur, hafıza dolar. Pahalı donanım gereklidir.

## Çok Yavaş Örneklersek (Düşük $f_s$ )

- ✓ Veri boyutu çok küçük olur.
- ✗ Orijinal sinyalin şeklini kaybederiz.  
Aradaki hızlı değişimleri kaçırırız.  
(Bu hatanın özel bir adı vardır:  
**Aliasing**).

**Öyle bir sınır (alt limit) bulmalıyız ki, hem veriyi gereksiz şışirmeyelim, hem de orijinal sinyali kayıpsız geri üretebilelim.**

# Senaryo 1: Çok Hızlı Örnekleme (Yüksek $f_s$ )

Sinyali gereğinden çok daha sık ( $f_s \gg f_{max}$ ) örneklediğimizde ne olur?

## Avantajlar

- ✓ Sinyal dalga formu neredeyse kusursuz (analog gibi) görünür.
- ✓ Analog-Dijital çevrim hataları minimize edilir.

## Dezavantajlar (Teknik Kısıtları)

- ✗ **Veri Patlaması:** Depolama alanınız (HDD/SD Kart) çok hızlı dolar.
- ✗ **İşlemci Yükü:** İşlemcinin (DSP/CPU) her saniye milyonlarca ek veriyi işlemesi gereklidir, cihaz ısınır.
- ✗ **Maliyet:** Çok yüksek hızlı ADC çipleri ve geniş bant genişliği pahalıdır.

## Senaryo 2: Çok Yavaş Örnekleme (Düşük $f_s$ )

Sinyaldeki değişimlerden daha yavaş örnek alırsak ( $f_s < 2f_{max}$ ) ne olur?

### Kritik Hatalar

- **Bilgi Kaybı:** Sinyalin tepe ve çukur noktalarını kaçırmır.
- **Şekil Bozulması:** Orijinal sinyal bilgisayarda tamamen farklı bir dalga gibi görünür.
- **Aliasing (Örtüşme):** Hızlı değişimler, yavaş değişimlermiş gibi kılık değiştirir.

*Sonuç: Geri dönüşü olmayan veri kaybı!*



Kırmızı noktalar: Seyrek örnekler.  
Mavi sinyal, kırmızı kesikli çizgiye dönüşür.

# Teknolojik Denge: Ne Çok Hızlı, Ne Çok Yavaş

- **Ekonominik Hedef:** Minimum veri boyutuyla maksimum bilgi taşımak.
- **Teknik Hedef:** Sinyali analoga geri döndürürken (DAC) hatasız geri çatabilmek.

## Arama Konusu:

Öyle bir sınır (alt limit) bulmalıyız ki, hem veriyi gereksiz sıkışirmeyelim, hem de orijinal sinyali kayıpsız geri üretebilelim.

## Çözüm

Bu dengeyi kuran matematiksel kurala **Nyquist-Shannon Örnekleme Teoremi** denir. Bir sonraki slaytta bu "sihirli sınırı" öğreneceğiz.

# Nyquist-Shannon Örnekleme Teoremi

Haberleşme teknolojisinin en kutsal kuralıdır.

## Nyquist Kuralı:

Bir sinyali kayıpsız olarak dijitalé çevirip sonra tekrar analoga dönüştürebilmek için; örnekleme frekansı ( $f_s$ ), sinyalin içindeki **en yüksek frekanslı** bileşenin ( $f_{\max}$ ) **en az iki katı** olmalıdır.

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

- Yani bir dalgayı tanımlayabilmek için, o dalganın bir periyodundan **en az iki nokta** (tepe ve çukur) yakalamak zorundasınız.
- $f_s/2$  değerine **Nyquist Frekansı (Kapanma Frekansı)** denir. Sisteminizin ölçüleceği maksimum hız sınırıdır.

# Haberleşmeden Pratik Örnekler

## 1. Telefon (İnsan Sesi)

- İnsan sesinin anlaşılabilirliği için gereken maksimum frekans yaklaşık **4 kHz**'dir.
- Haberleşme standartlarında telefon hattı 4 kHz ile sınırlanır.
- **Nyquist:**  $f_s \geq 2 \times 4000 = 8000$  Hz.
- Bu yüzden tüm dünyada standart dijital sesli arama (PSTN/ISDN) **8 kHz** ile örneklenir.

## 2. CD Kalitesinde Müzik

- Sağlıklı bir insan kulağı en fazla **20 kHz** tiz sesleri duyabilir.
- **Nyquist:**  
$$f_s \geq 2 \times 20000 = 40000$$
 Hz.
- Sinyal işleme payı ve filtreleme marji bırakılarak CD ses standardı **44.1 kHz** (veya stüdyo için 48 kHz) olarak belirlenmiştir.

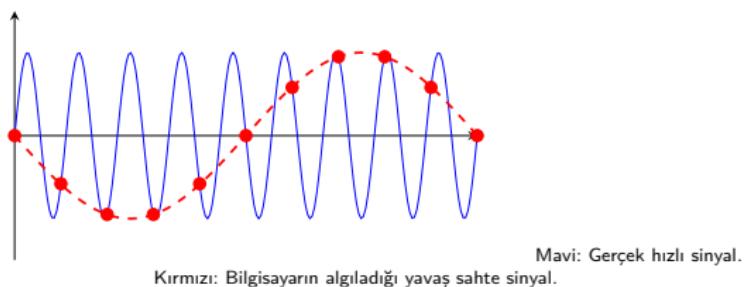
# Nyquist Kuralına Uymazsa Ne Olur?: Aliasing (Örtüşme)

Eğer çok yavaş örneklersek ( $f_s < 2f_{\max}$ ), yüksek frekanslı hızlı sinyaller kimlik değiştirir. Dijital dünyada sanki **düşük frekanslı yavaş bir sinyalmiş gibi** görünürlər. Bu yanlışlara **Aliasing** denir.

## Görsel Analoji: Vagon Tekeri Etkisi

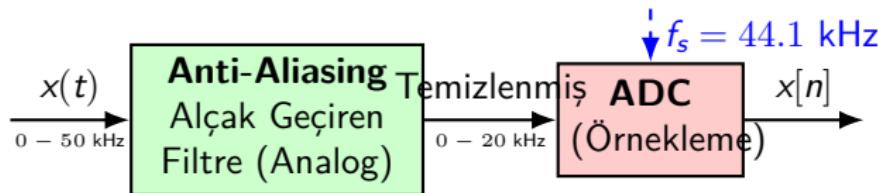
Filmlerde hızla ileri dönen araba veya helikopter pervanesinin, bir süre sonra **geriye doğru yavaşça dönüyormuş gibi** görünmesi olayıdır. Kamera (Örnekleyici) yeterince hızlı kare yakalayamadığı için Aliasing hatası yapar.

Yüksek frekanslı giriş ve oluşan "Sahte" sinyal



# Aliasing Olgusunu Nasıl Önleriz? (Anti-Aliasing Filtresi)

Bir sinyali ADC çipine (Dijitalleştiriciye) sokmadan önce, Nyquist kuralını bozacak ( $f_s/2$ 'den büyük) tüm yüksek frekanslı "istenmeyen" bileşenleri **tıraşlamak** zorundayız.

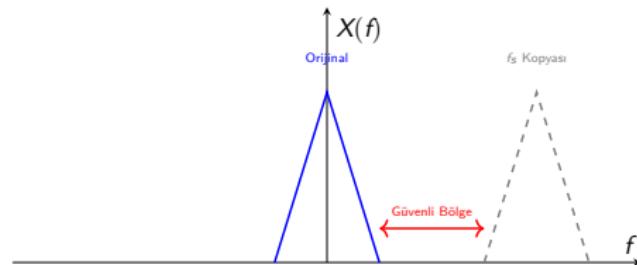


## Haberleşme Zincirindeki Yeri

Anti-Aliasingfiltresi, donanımsal bir analog filtredir. ADC çipinden hemen önce fiziksel devre elemanlarıyla (Direnç, Kondansatör, Op-Amp) kurulur. Sistemin kapı bekçisidir; kapasiteyi aşan frekansların içeri girmesine izin vermez.

# Frekans Düzleminde Örnekleme ve Örtüşme

Örnekleme, sinyalin spektrumunu  $f_s$  aralıklarla kopyalar.

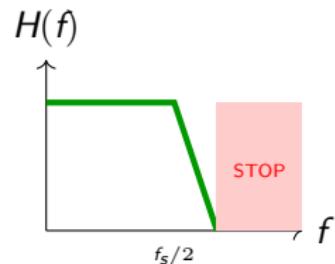


- **Nyquist Sınırı:** Eğer  $f_s$  yeterince büyükse, bu üçgenler arasında boşluk kalır.
- **Örtüşme (Aliasing):** Eğer  $f_s$  küçük seçilirse, kopyalar birbirinin üzerine biner. Alıcı, hangi frekansın orijinal hangisinin kopya olduğunu ayırt edemez.

## Anti-Aliasing Filtresi: Sistemin Kapı Bekçisi

Bir ADC sisteminde örneklemeden hemen önce kullanılan **Alçak Geçiren Filtre (LPF)**, Nyquist sınırını aşan gürültüleri temizler.

- $f_s/2$  üzerindeki tüm frekansları keser.
  - Gerçek dünyada sinyaller sınırsız bant genişliğine sahip olabilir.
  - Bu filtre olmasaydı, yüksek frekanslı gürültüler "sahte düşük frekans" olarak verimizde karışırıdı.



# Uygulamada Standart Örnekleme Hızları

Sinyal Tipi	Maks. Frekans	Örnekleme ( $f_s$ )	Kullanım Alanı
Sismik (Deprem)	20 - 50 Hz	100 - 200 Hz	Jeofizik Ölçüm
EKG (Kalp Ritmi)	100 - 150 Hz	250 - 500 Hz	Hasta Monitörleri
Telefon (Ses)	3.4 kHz	8,000 Hz	Sayısal Santraller
Vibrasyon (Makine)	5 kHz	12,800 Hz	Bakım Onarım
CD Kalite Müzik	20 kHz	44,100 Hz	Eğlence Endüstrisi
DVD / Stüdyo	24 kHz	48,000 Hz	Profesyonel Kayıt

## Teknik Pratik: Neden Tam 2 Katı Değil?

Gerçek dünyada filtrelerin kusursuz (keskin) olmaması ve hesaplama payı nedeniyle, örnekleme hızı genellikle teorik sınırın **2.2 veya 2.5 katı** seçilir.

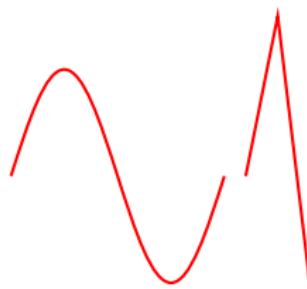
$$f_s \approx 2.2 \times f_{\max}$$

# Sınıf İçi Etkinlik - 1: EKG Ölçümü

## Problem 1: Biyomedikal Sensör Tasarımı

Bir hastanede kullanılacak olan EKG (kalp ritmi) sensörü, tıbbi analizler için en fazla 100 Hz frekansına sahip elektriksel bileşenler üretmektedir.

- **Soru:** Bu kalp sinyalini bilgisayar ortamına veri kaybı olmadan aktarabilmek için seçilmesi gereken **minimum** örnekleme frekansı ( $f_s$ ) ne olmalıdır?
- **Düşün:** Nyquist kuralı ne diyor?  $f_s \geq ?$



EKG Sinyali (100 Hz)

# Sınıf İçi Etkinlik - 2: Ses Kaydı ve Hata Analizi

## Problem 2: İslık Kaydı

Bir öğrenci, 10 kHz frekansında çok tiz bir ıslık çalışıyor. Bu sesi bilgisayarına  $f_s = 15$  kHz hızında örnekleme yapan ucuz bir mikrofonla kaydediyor.

- ① Bu sistemde Nyquist kuralına uyulmuş mudur? Neden?
- ② Eğer uyulmadıysa, bilgisayarda kaydı dinlediğimizde duyacağımız “Sahte (Aliased)” frekans kaç kHz olur?

## İpucu: Katlanma Formülü

Örnekleme hızı yetersizse sinyal  $f_{sahte} = |f_s - f_{max}|$  formülüyle frekans ekseninde geri katlanır.

# Etkinlik Çözümleri: Mühendislik Analizi

## Çözüm 1: EKG Sinyali

Nyquist Teoremi gereği:

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

Verilen:  $f_{\max} = 100 \text{ Hz}$

$$f_s \geq 2 \cdot 100 \text{ Hz}$$

**Cevap:** En az 200 Hz örnekleme hızı seçilmelidir.

## Çözüm 2: İslık Kaydı

Verilen:  $f_{\max} = 10 \text{ kHz}$ ,  $f_s = 15 \text{ kHz}$

- **Kontrol:**  $2 \cdot f_{\max} = 20 \text{ kHz}$ .
- $15 < 20$  olduğu için **Nyquist kuralına uyulmamıştır!**
- **Katlanma:**  $f_{sahte} = |f_s - f_{\max}|$

$$|15 - 10| = 5 \text{ kHz}$$

## Teknik Yorum: Aliasing Etkisi

Öğrencinin 10 kHz (tiz) frekansındaki ıslığı, bilgisayar tarafından yanlışlıkla 5 kHz (daha pes/kalın) bir ses olarak kaydedilir.

- **Sonuç:** Veri kimlik değiştirmiştir; orijinal sinyale geri dönmek artık imkansızdır.

# Dersin Özeti: 3 Altın Kural

- ① **Zamanı Dilimle:** Örnekleme, sürekli sinyali belirli aralıklarla ( $T_s$ ) sayısallaştırmaktır.
- ② **Hız Önemlidir:** Eğer sinyalden daha yavaş örnek alırsan, sinyal “kılık değiştirir” (Aliasing).
- ③ **Filtre Hayat Kurtarıır:** Her ADC'den önce mutlaka bir **Alçak Geçiren Filtre** kullanılır ki sistemin kapasitesinden yüksek frekanslar içeri girip veriyi bozmasın.

*“Örnekleme hızı, görmeyi umduğunuz hareketin en az iki katı olmalıdır.”*

## Gelecek Hafta:

### Analogdan Dijitale Geçiş (ADC) - Bölüm 2

Kuantalama (Quantization) ve Sinyal-Gürültü Oranı (SNR)

- Zamanı dilimledik (Örnekleme), peki genliği (voltajı) nasıl yuvarlayacağız?
- 8-bit müzik ile 16-bit müzik arasındaki fark nedir?

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Oğuz | İstanbul Okan Üniversitesi