

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

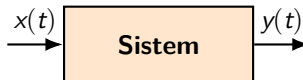
Geçen hafta, sinyalleri işleyen “Kara Kutu”lara **Sistem** dendiğini öğrendik.

İdeal Bir Sistemin Özellikleri

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

Altın Kural: Nedensellik

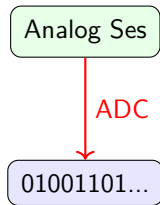
- Gerçek zamanlı sistemler **Geleceği Göremez**.
- Çıkış sadece şu anki ve geçmiş girişlere bağlıdır.



Neden Dijitale Dönüşüm? (Haberleşme Gözüyle)

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

- **Gürültü Bağımsızlığı:** 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

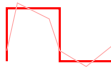
- Sinyale gürültü eklendiğinde, gürültüyü sinyalden ayırmak imkansızdır.
- Yükseltici (Amplifier), gürültüyü de yükseltir.

Dijital İletim

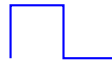
- Sinyal sadece 1 ve 0 olduğu için, küçük bozulmalar sonucu değiştirmez.
- **Rejenerasyon:** Eşik değerin üzerindeyse 1, altındaysa 0 diyerek sinyal



Gürültülü Analog



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 yöntemle göre çok daha kolay ve verimlidir.

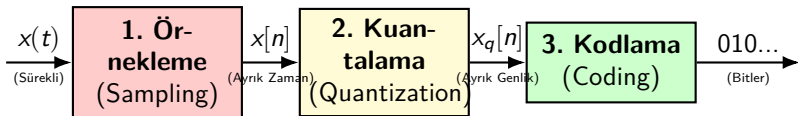
Teknik Perspektif

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: Örneklem (Sampling)

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

Örnekleme (Sampling) Nedir?

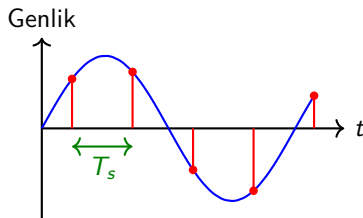
Örnekleme: Sürekli akan zamanı (t), belirli aralıklarla “dondurup” o andaki değeri okuma işlemidir.

Parametreler:

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

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

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

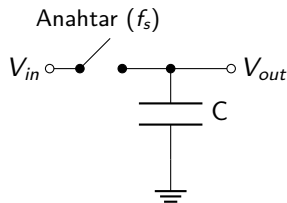


Kırmızı noktalar: Örneklenmiş dijital dizi ($x[n]$).

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

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

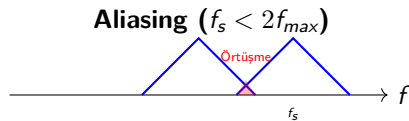
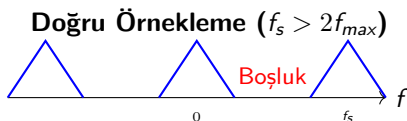
- **Anahtarlama:** Bir elektronik anahtar T_s aralıklarla çok hızlı açılıp kapanır.
- **Kondansatörün Rolü:** Anahtar kapandığında girişteki voltaj bir kondansatöre dolar.
- **Tutma (Hold):** Anahtar açıldığında, kondansatör üzerindeki voltajı bir sonraki örneğe kadar sabit tutar.



Neden Tutuyoruz? Çünkü kuantalama (haftaya işlenecek) işlemi zaman alır; sinyalin bu sürede kırıldamaması gerekir.

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 Örneklesek (Yüksek f_s)

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

Çok Yavaş Örneklesek (Düşük f_s)

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

Öyle bir sınır (alt limit) bulmalıyız ki, hem veriyi gereksiz şişirmeyelim, 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)

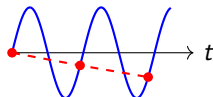
- ✗ **Veri Patlaması:** Depolama alanınız (HDD/SD Kart) çok hızlı dolar.
- ✗ **İşlemci Yüğü:** İşlemcinin (DSP/CPU) her saniye milyonlarca ek veriyi işlemesi gerekir, cihaz ısınır.
- ✗ **Maliyet:** Çok yüksek hızlı ADC çipleri ve geniş bant genişliği pahalıdır.

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 kaçıırız.
- **Şekil Bozulması:** Orijinal sinyal bilgisayarda tamamen farklı bir dalga gibi görünür.
- **Aliasing (Örtüşme):** Hızlı değişimler, yavaş değişimlermiş gibi kılık değiştirir.



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

Sonuç: Geri dönüşü olmayan veri kaybı!

Teknolojik Denge: Ne Çok Hızlı, Ne Çok Yavaş

- **Ekonomik 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 şişirmeyelim, hem de orijinal sinyali kayıpsız geri üretebileyim.

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 dijitale 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 dalga'nın bir periyodundan **en az iki nokta** (tepe ve çukur) yakalamak zorundasınız.
- $f_s/2$ değerine **Nyquist Frekansı (Kapanma Frekansı)** denir. Sisteminizin ölçebileceği 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 sınırlandırılır.
- **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 marjı bırakılarak CD ses standardı **44.1 kHz** (veya stüdyo için 48 kHz) olarak belirlenmiştir.

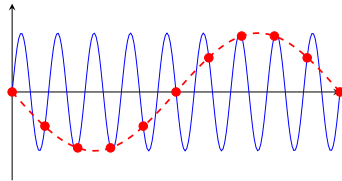
Nyquist Kuralına Uymazsak Ne Olur?: Aliasing (Örtüşme)

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

Görsel Analoji: Vagon Teker 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.

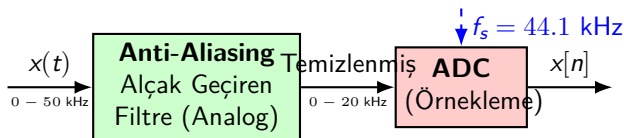
Yüksek frekanslı giriş ve oluşan “Sahte” sinyal



Mavi: Gerçek hızlı sinyal.
Kırmızı: Bilgisayarın algıladığı yavaş 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.

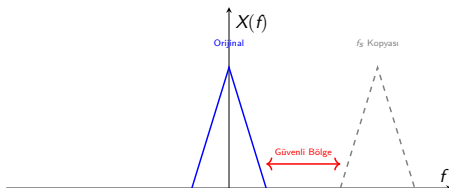


Haberleşme Zincirindeki Yeri

Anti-Aliasing filtresi, 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.

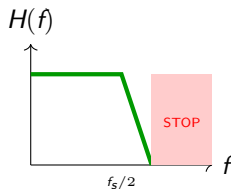


- **Nyquist Sınırı:** Eğer f_s yeterince büyükse, bu üçgenler arasında boşluk kalır.
- **Örtüşme (Aliasing):** Eğer f_s küçük seçilirse, kopyalar birbirinin üzerine biner. Alıcı, hangi frekansın orijinal hangisinin kopya olduğunu ayırt edemez.

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 verimize karışırdı.



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.

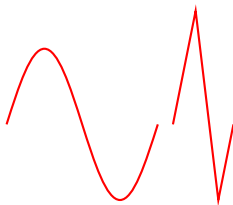
$$f_s \approx 2.2 \times f_{\max}$$

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 diyordu? $f_s \geq ?$



EKG Sinyali (100 Hz)

Sınıf İçi Etkinlik - 2: Ses Kaydı ve Hata Analizi

Problem 2: Islık Kaydı

Bir öğrenci, 10 kHz frekansında çok tiz bir ıslık çalıyor. 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: $f_{\max} = 100$ Hz

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

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

Çözüm 2: Isık Kaydı

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

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

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

Teknik Yorum: Aliasing Etkisi

Öğrencinin 10 kHz (tiz) frekansındaki ısıığı, 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 Kurtarır:** 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