

Dr. Sadık YILDIZ

sadikyildiz06@gmail.com

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

2025– ANKARA

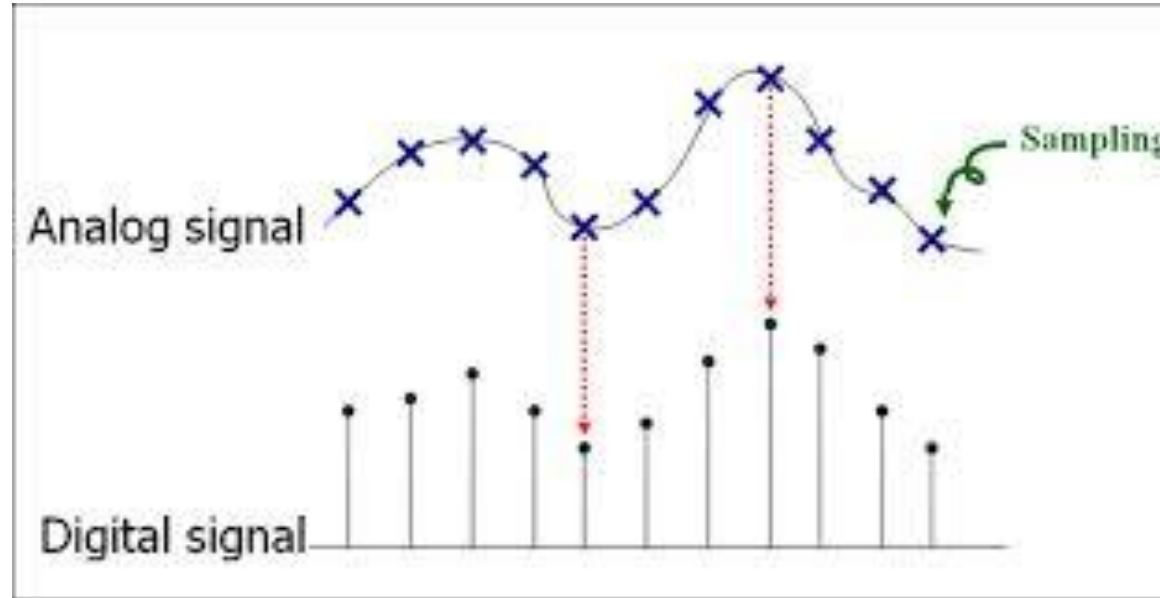
DERS İÇERİĞİ

Hafta	E322 HABERLEŞME SİSTEMLERİ-II
1	Sayısal haberleşmeye giriş, Sayısal haberleşme sistemlerinin temel elemanları
2	Darbe Modülasyonu: Örneklemme, kuantalama ve analog sinyallerin kodlanması
3	Darbe Modülasyonu: Örneklemme, nicemleme ve analog sinyallerin kodlanması
4	Darbe kod modülasyonu
5	Sayısal tabanband iletimi
6	Hat kodlaması, Tek kutuplu işaretleme, kutuplu işaretleme
7	Faz kodlanmış işaretleme, Çift kutuplu işaretleme
8	Ara Sınav, kodlanmış işaretleme, Çift kutuplu işaretleme
9	Taban band işaretlerin sezilmesi
10	Sayısal modülasyonlar
11	Geçişbandı modülasyonları
12	Çoğullama ve çoklu erişim
13	Kaynak kodlama
14	Modemler

SAYISAL HABERLEŞME

1.1. SAYISAL HABERLEŞME

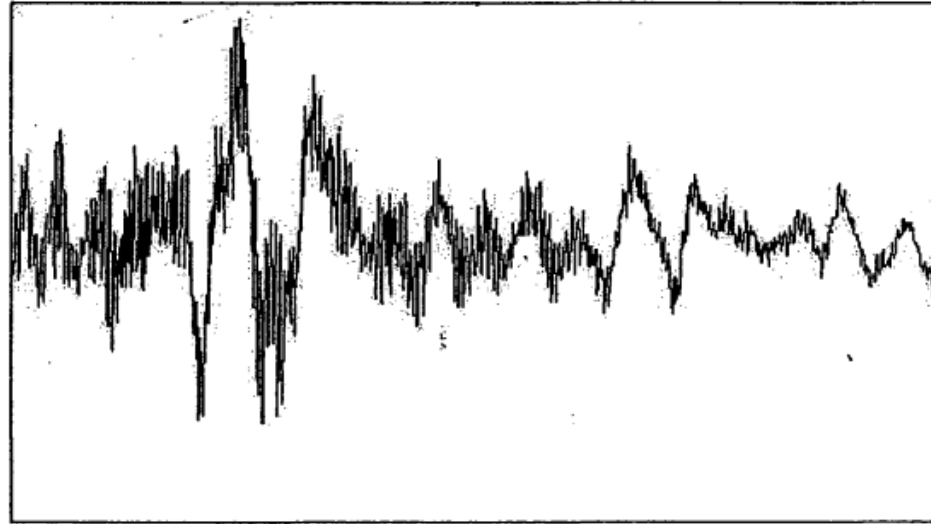
- Haberleşme (iletişim), her türlü bilgi aktarımı veya değiş tokuşu olarak tanımlanmaktadır.
- Elektronik anlamda haberleşme, belirli mesafeler arasında elektronik yapılar kullanarak bilgi aktarımının sağlanması anlamına gelmektedir.
- Elektronik haberleşme genelde ses, görüntü veya veri iletimi ile sağlanmakta
- Bakır kablo üzerinden elektriksel işaretlerin, Fiber optik kablo üzerinden ışık işaretlerinin, veya havadan elektromanyetik dalgaların iletimi ile gerçekleştirilebilmektedir.



SAYISAL HABERLEŞME

1.1. SAYISAL HABERLEŞME

- **İşaretler (Sinyaller)**: Bilgi taşıyan fonksiyonlar olarak tanımlanmaktadır.
- Örneğin ses, müzik, görüntü, borsa endeks verileri ve hava sıcaklığı verileri gibi işaretler **olayların durumu, yapısı veya davranışı** hakkında bilgi içermektedir.
- İşaretler, örneğin ses işaretlerinde olduğu gibi, bir zaman aralığının bütün anlarında tanımlanmış ise ve bu anlarda herhangi bir değeri serbestçe alabiliyorsa, **analog işaretler** olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1' de örnek bir analog ses işareti genliğinin zamana göre değişimi gösterilmektedir.

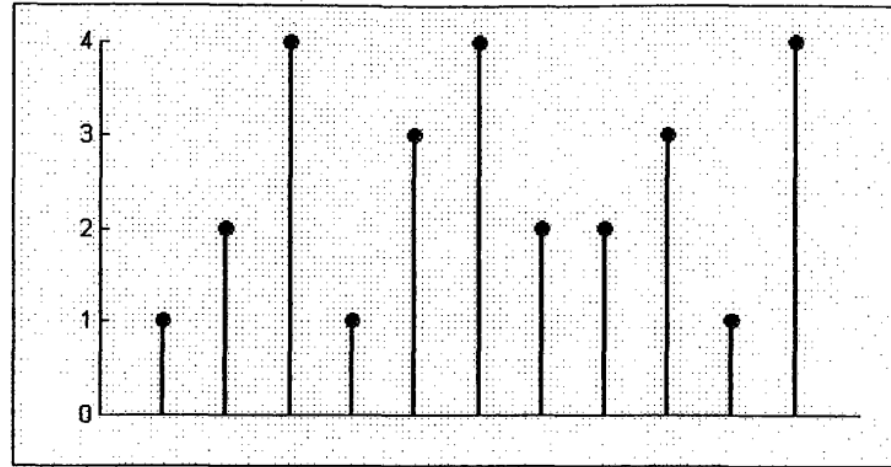


Şekil 1.1 – Analog bir ses işaretinin zamana göre değişimi

SAYISAL HABERLEŞME

1.1. SAYISAL HABERLEŞME

- Bir zaman aralığının bütünü yerine sadece **belirli zaman anlarında** tanımlanmış ve sadece **belirli değerleri** alabilen işaretler **sayısal işaretler** olarak adlandırılmaktadır.
- Şekil 2'de sadece **bir, iki, üç ve dört** değerlerini alabilen örnek bir **sayısal işaret genliğinin** zamana göre değişimi gösterilmektedir.
- Sayısal işaretler, çeviriciler aracılığıyla analog işaretlerden elde edilebileceği gibi, telgraf hatlarında kullanılan Mors alfabesinde olduğu gibi yapı itibariyle doğrudan sayısal olan işaretler de bulunmaktadır.



Şekil 1.2 – Sayısal bir işaretin genliğinin zamana göre değişimi

SAYISAL HABERLEŞME

1.1. SAYISAL HABERLEŞME

- Bir Bilgi işareti, ***bilgiyi üreten kaynağın yapısına göre*** analog veya sayısal yapıda olabilmektedir.
- Örneğin bir ***mikrofon kullanarak*** ses dalgalarıyla orantılı bir ***analog işaretin*** elde edilmesi mümkün olmaktadır.
- Bir bilgisayar terminalinin çıkışındaki işaret ise doğrudan sayısal yapıda olmaktadır.
- Bu nedenle ***bilgi işaretini üreten kaynağın ürettiği, işaretin yapısına göre analog veya sayısal*** olarak sınıflandırılabilir.

1.1. SAYISAL HABERLEŞME

- Bilgi işareti yapı itibariyle ***sayısal biçimde*** ise, sayısal iletim doğrudan gerçekleştirilebilmektedir.
- Eğer bilgi işareti yapı itibariyle ***analog biçimde*** ise, sayısal iletim için bilginin önce analog yapıdan sayısal yapıya dönüştürülmesi gerekmektedir.
- Gönderici tarafında ***analog/sayısal dönüştürücü (ADC)*** kullanılarak sayısal forma dönüştürülen bilgi işaretinin sayısal iletimi gerçekleştirildikten sonra alıcı tarafında ***sayısal/analog dönüştürücü (DAC)*** kullanılarak ***işaretin özgün analog hali tekrar elde edilebilmektedir.***

1.1. SAYISAL HABERLEŞME

- Bilgi akışının şekline göre haberleşme sistemleri **tek-yönlü** veya **çift-yönlü** sistemler olarak sınıflandırılabilir.
- Çift yönlü bilgi akışının sağlandığı **geleneksel telefon şebekesi**, iki nokta arasında karşılıklı iletişimin sağlandığı haberleşme sistemlerine bir örnek teşkil etmektedir.
- Genel olarak sadece tek yönlü bilgi akışının sağlandığı radyo ve televizyon yayınlarında ise, **bir noktadan birden fazla noktaya bilgi iletimi** yapılmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

1.2. SAYISAL HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN ÜSTÜNLÜKLERİ

- Sayısal iletim, gürültü ve girişimden daha az etkilendiği için **daha kaliteli bir haberleşme** imkanı sağlamaktadır.
- Haberleşme sırasında **gürültü** ve **haberleşme kanalı kaynaklı** iletilen işarette meydana gelen **bozulmaların etkilerinin giderilmesi** analog sinyallere göre daha kolaydır.
- Sayısal iletimin bir diğer üstünlüğü, sayısal işaretlerin analog işaretlere oranla **daha kolay yeniden üretilebilme özelliğidir.** (Switch kullanımı)
- Sayısal işaretlerin analog işaretlere oranla **daha kolay işlenmesi önemli bir üstünlük sağlamaktadır.** Örneğin, sayısal bir işaret analog işarete oranla çok daha kolay ve güvenilir yöntemlerle şifrelenebilmektedir.

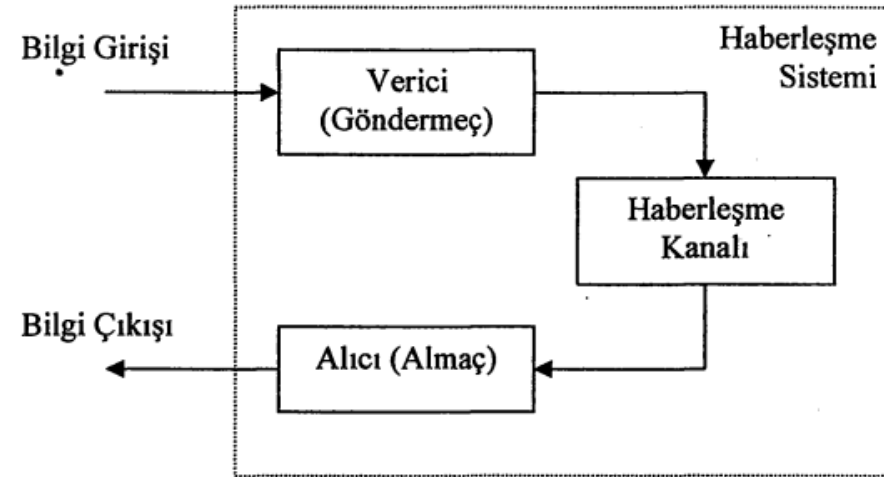
SAYISAL HABERLEŞME

1.2. SAYISAL HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN ÜSTÜNLÜKLERİ

- **Farklı yapıdaki bilgi kaynaklarına ait işaretlerin ortak haberleşme kanallarından** sayısal iletimi daha kolay ve verimli olmaktadır. (Fiber Optik Kablo)
- Sayısal sistemler genelde analog sistemlere göre **daha dayanıklı** ve **daha düşük maliyetlidir**. Özellikle tümleşik devreler teknolojisinde meydana gelen hızlı ilerlemeler sayesinde sayısal sistemler çok daha ekonomik olmaktadır.
- Buna ek olarak sayısal donanımın analog donanıma göre çok **daha esnek uygulama** ve **kullanım imkanı** sağlaması da sayısal haberleşme sistemlerinin tercih edilmesinin sebeplerinden birisini oluşturmaktadır.
- Sayısal haberleşme sistemlerinin analog haberleşme sistemlerine göre dezavantajları da bulunmaktadır.
 - Sayısal iletim için **daha fazla bant genişliğine** ihtiyaç duyulması
 - **Eşzamanlamanın sağlanması** gerekliliği sayısal haberleşme sistemlerinin dezavantajlarını oluşturmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

1.3. HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TEMEL YAPISI

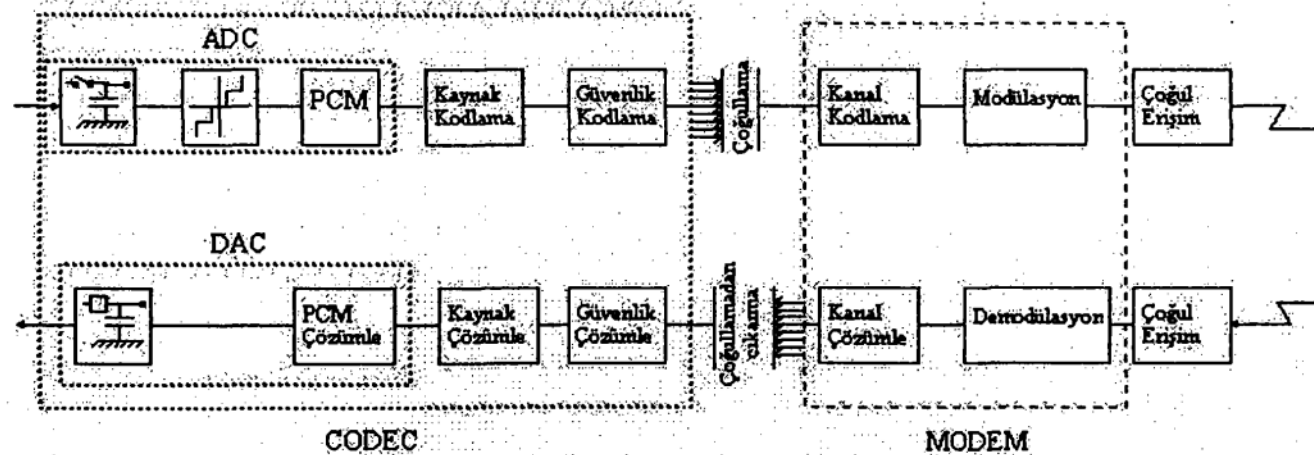


Şekil 1.3 – Haberleşme sistemlerinin temel yapısı

SAYISAL HABERLEŞME

1.4. SAYISAL HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TEMEL ELEMANLARI

- Sayısal haberleşme sistemlerinin temel elemanları Şekil 4'de gösterilmektedir.
- Her haberleşme sistemi için **modülasyon** ve **demodülasyon** elemanlarının mutlaka bulunması gerekmektedir.
- Gönderilecek bilgi yapı itibariyle analog formda ise **analog/sayısal** ve **sayısal/analog** dönüştürücüler de sistemde mutlaka kullanılmaktadır.
- Diğer sistem elemanları ise **isteğe ve ihtiyaca bağlı** olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.5 – Sayısal haberleşme sistemlerinin temel elemanları

SAYISAL HABERLEŞME

1.4. SAYISAL HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TEMEL ELEMANLARI

- **Analog/sayısal dönüştürücüler (ADC):** Analog bilgi işaretlerinin sayısal iletimi için gönderici tarafında analog/sayısal dönüştürücüler (ADC) kullanılarak sayısal forma çevrilir.
- Analog/sayısal dönüştürücüde ilk işlem analog işaretin belirli zaman aralıklarında **örneklenmesi** sonucu, **analog sürekli zaman işaretinin** bir **kesikli (ayrık) zaman işaretine** dönüştürülmesi olmaktadır. Örneklemme sonucunda analog işaret, zaman ekseninde (uzayında) sayısallaştırılmaktadır.
 - İkinci aşamada örneklenmiş işaretin genlik değerleri, önceden belirlenmiş sınırlı sayıdaki genlik değerinden **en yakın olan seviyeye çekilmekte (kuantalanmakta)** ve bu sayede işaretin sadece sınırlı sayıda genlik değeri almasına izin verilmektedir. Kuantalama işlemiyle örneklenmiş olan analog işaret, **genlik ekseninde (uzayında) sayısallaştırılmaktadır**.
 - Analog/sayısal çeviricinin son işlevi ise kuantalanan genlik seviyelerini sayısal sembollerle ifade etmektir **(Darbe Genlik Modülasyonu, PCM)**. Bu sayede analog işaretin bir sayısal sembol dizini şeklinde ifade edilmesi sağlanmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

1.4. SAYISAL HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TEMEL ELEMANLARI

- **Kaynak kodlaması** : **Veri sıkıştırması** sağlayarak iletilmesi gereken **veri miktarını azaltmaktır**. Sayısal verideki sıkıştırma sonucunda sistem kaynaklarının daha verimli kullanılması amaçlanmaktadır.
- **Güvenlik kodlaması** : Sayısal sembol dizini **şifrelenmekte** ve bu sayede haberleşme esnasında **güvenlik sağlanmaktadır**. Şifreleme çözülmeden verilerin tekrar anlamlı bir bütün haline getirilmesi mümkün olmadığından istenmeyen kişilerin bilgiye erişimi güvenlik kodlaması ile zorlaştırılmaktadır.
- **Çoğullama** : Aynı anda ortak bir kanaldan birden fazla bilgi işareti iletiminin gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır.
 - Çoğullama analog işaretlerde **frekans uzayının** paylaşılması (**frekans bölüşümlü çoğullama**) ile gerçekleştirilirken, sayısal işaretlerde **zaman uzayının** paylaşılması (**zaman bölüşümlü çoğullama**) ile gerçekleştirilebilmektedir.
 - Çoğullama sayesinde **tek haberleşme kanalından** birden fazla işaretin iletimine olanak tanınmakta ve bunun sonucunda haberleşme kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması sağlanmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

1.4. SAYISAL HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TEMEL ELEMANLARI

- **Kanal kodlaması** :İşareti haberleşme kanalının istenmeyen etkilerine dayanıklı hale getirmektir.
 - Bu amaçla **işaret şekli** haberleşme kanalının fiziksel özelliklerine uygun olarak biçimlendirilebilmektedir.
 - Ayrıca hata kontrol kodlaması ile haberleşme kanalındaki gürültü gibi bozucu etmenlerden daha az etkilenilmesi sağlanabilmektedir.
- **Modülasyon** : Bilgi sinyali, iletim kanalında iletme uygun bir işaret haline getirilmektedir.
 - Modülasyon, bilgi işaretine bağlı olarak bir taşıyıcı dalgasının **genlik, faz** veya **frekans** gibi niteliklerinin değiştirilmesi temeline dayanmaktadır.
 - Tabanbant sayısal modülasyonunda tipik olarak darbe (genelde dikdörtgensel darbe) biçiminde işaretler kullanılmaktadır. Geçiş bandından gerçekleştirilen iletimlerde ise taşıyıcı olarak , bir sürekli zaman dalgası (genellikle sinüzoidal dalga) kullanılmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

1.4. SAYISAL HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TEMEL ELEMANLARI

- **Çoğul erişim, veya çoklu erişim** : Birden fazla alıcı-verici çiftinin haberleşme ortamını paylaşmasını sağlar. Bu sayede sınırlı olan haberleşme ortamlarının (kablo veya hava) etkin şekilde ortak kullanımı sağlanmaktadır.
- **Alıcıda** ise haberleşme kanalının *istenmeyen etkileri* giderilmeye çalışılmakta ve vericinin yaptığı işlemler *tersine çevrilerek bilgi işareti geri oluşturulmaktadır*.

SAYISAL HABERLEŞME

2.1. TEMEL İŞARET ÖZELLİKLERİ

- Haberleşme sistemlerinde kullanılan işaretler, ***zamana bağlı gerilim*** veya ***zamana bağlı akım*** fonksiyonları şeklinde gösterilebilmektedir. Çoğu durumda bir ayırım yapılmadan, ortak bir işaret gösterimi kullanılmaktadır.
- Genelde haberleşme sistemlerinin analiz ve sentezi için işaretlerin matematiksel ifadesi tercih edilmekle beraber, matematiksel ifadelerin hayata geçirilebilen gerçek işaretler vermeyebileceğine dikkat edilmelidir. Gerçek hayatın aksine, matematiksel gösterimde negatif frekanslar, sonsuz zaman/frekans uzunlukları ve devamsızlıklar kullanılabilmektedir. Bu nedenle ***matematiksel olarak ifade edilen işaretler ile fiziksel olarak gerçekleştirilebilecek işaretler arasındaki ilişkinin*** kavranması önem taşımaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

2.1. TEMEL İŞARET ÖZELLİKLERİ

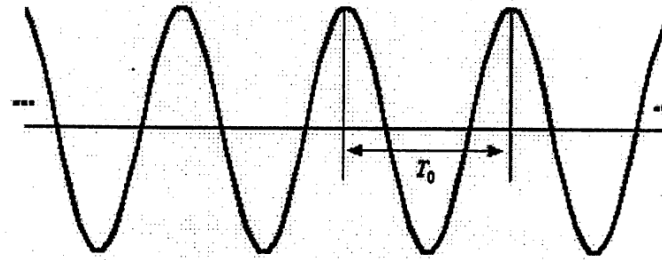
□ Periyodik İşaretler

Bir işaret her zaman için ($\forall t$)

$$s(t) = s(t + T_0)$$

eşitliğini sağladığı takdirde işaret **periyodiktir** ve bu eşitliği geçerli kılan en küçük sabit T_0 değeri işaretin periyodu olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1'de örnek bir periyodik işaret gösterilmektedir.

- Periyodik işaretler **eksi-sonsuz zamanından** başlayıp **artı-sonsuz zamanına** kadar devam ettiğinden, periyodik bir işaretin **fiziksel olarak gerçekleştirilmesi mümkün olmamaktadır**.
- Fiziksel olarak gerçekleştirilebilen işaretler **ancak belirli bir zaman aralığında periyodik** olabilmektedir.



Şekil 2.1 – Periyodik bir işaret

SAYISAL HABERLEŞME

2.1. TEMEL İŞARET ÖZELLİKLERİ

❑ Zaman Ortalaması

Bir $s(t)$ işaretinin zaman ortalaması

$$s(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) dt \quad \text{olarak tanımlanmaktadır.}$$

- Periyodik işaretler için, zaman ortalaması işaretin herhangi bir periyotluk zaman dilimi üzerinden hesaplanabilmektedir.
- Zaman ortalaması doğrusal bir işlem olduğundan süperpozisyon ilkesini sağlamaktadır:

$$as_1(t) + bs_2(t) = a(s_1(t)) + b(s_2(t))$$

Bir işaretin zaman ortalaması genelde **dc değeri** olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.2'de örnek bir işaretin zaman ortalaması gösterilmektedir.



Şekil 2.2 – Bir işaretin zaman ortalaması (dc değeri)

SAYISAL HABERLEŞME

2.1. TEMEL İŞARET ÖZELLİKLERİ

□ Zaman Ortalaması

- Fiziksel olarak gerçekleştirilebilir işaretler sadece belirli bir zaman süresince tanımlı olabileceğinden, bu işaretler için zaman ortalaması işaretin tanımlı olduğu sonlu zaman aralığı için hesaplanmaktadır.
- Örneğin, t_1 ve t_2 anları arasında tanımlı bir fiziksel işaret için zaman ortalaması

- $s(t) = \frac{1}{|t_2 - t_1|} \int_{t_1}^{t_2} s(t) dt$ şeklinde hesaplanır



Şekil 2.2 – Bir işaretin zaman ortalaması (dc değeri)

SAYISAL HABERLEŞME

2.1. TEMEL İŞARET ÖZELLİKLERİ

□ Zaman Ortalaması

- İşaretler için yaygın olarak kullanılan **etkin değer (RMS değeri)**, zaman ortalaması operatörü kullanılarak
- $S_{RMS} = \sqrt{S^2(t)}$

Şekil 2.1 – Bir işaretin zaman ortalaması (dc değeri)

SAYISAL HABERLEŞME

2.1. TEMEL İŞARET ÖZELLİKLERİ

□ Normalize Edilmiş Güç

- Güç hesabı için bir devre ele alındığında ve bu devredeki direnç değeri R olarak gösterildiğinde, devredeki **ortalama güç**

$$P = \frac{v^2(t)}{R} = i^2(t)R \quad \text{olarak bulunmaktadır.}$$

- Haberleşme sistemlerinde, genelde birim direnç $R = 1\Omega$ değeri kabul edilerek hesaplanan, normalize edilmiş güç kullanılmaktadır. Bu nedenle, kullanılan işaret genellenecek olursa, normalize edilmiş ortalama güç

$$P = s^2(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s^2(t) dt \quad \text{şeklinde elde edilmektedir.}$$

- Görüldüğü gibi normalize edilmiş güç, **işaretin etkin değerinin karesine eşit** olmaktadır. Sonlu ve sıfırdan farklı bir güce sahip işaretler güç işareti olarak adlandırılmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

2.1. TEMEL İŞARET ÖZELLİKLERİ

❑ İşaret - Gürültü Oranı ve Desibel Kavramı

- **İşaret gücünün gürültü gücüne** oranı (SNR) işaret-gürültü oranı olarak adlandırılmaktadır.
- İşaret-gürültü oranı haberleşme sistemlerinde son derece önemlidir. Haberleşme sistemlerinde genelde işaret gücünün gürültü gücüne oranı,
- $SNR_{dB} = 10 \log \left(\frac{P_{işaret}}{P_{gürültü}} \right)$ ifadesi doğrultusunda **desibel (dB)** cinsinden belirtilmektedir.
- Analog haberleşme sistemlerinde alıcıdaki SNR değerine göre sistemlerin performansına karar verilebilmektedir.
- Analog haberleşme sistemlerinde tipik olarak yüksek kalitede müzik ve ses iletimi için 60 dB seviyesinde çıkış SNR değerleri kullanılmakta, ancak anlaşılabilir ses kalitesinde iletim için ise 10 dB seviyesinde çıkış SNR değerleri kullanılabilir.
- Alıcıda alınan işaretin gücü, vericiden iletilen işaretin gücüne bağlı olarak değiştiğinden iletilen gücün arttırılması sayesinde analog haberleşme sisteminde daha yüksek bir çıkış SNR değeri elde edilebilmekte, yani iletim kalitesi arttırılabilmektedir. Fakat, bu durumda iletim için kullanılan güç ve iletim maliyeti artmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

2.1. TEMEL İŞARET ÖZELLİKLERİ

□ Bit Hata Oranı

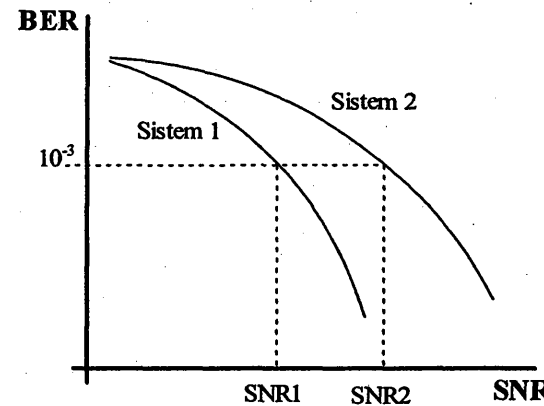
- Sayısal haberleşme sistemlerinde iletim kalitesi, alıcıda bit veya sembollerin hatalı alınma olasılığı ile ölçülmektedir.
- Hatalı alınan bitlerin oranını gösteren **bit hata oranı (BER)** veya hatalı olarak alınan sembollerin oranını gösteren **sembol hata oranı (SER)** kullanılabilmektedir.
- Örneğin bit hata olasılığı 10 olarak verildiğinde, ortalamada iletilen her bin bitten biri alıcıda hatalı olarak alınıyor anlamına gelmektedir.
- Sayısal haberleşme sisteminde meydana gelen **hata olasılığı** tipik olarak **iletim yapılan güce** bağlı olduğundan, çoğu durumda **bir sistemin performansı değerlendirilirken hata oranının iletim gücüne göre değişimi** incelenmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

2.1. TEMEL İŞARET ÖZELLİKLERİ

Bit Hata Oranı

- Şekil 2.3'de örnek iki sayısal haberleşme sistemi için **bit hata oranının** **iletim SNR** değerine göre değişimi gösterilmektedir.
- Burada birinci sistem, aynı hata oranını daha düşük iletim SNR değeri, dolayısıyla daha düşük iletim gücü ile yakalamaktadır. Bu nedenle güç kullanımına bağlı olarak elde edilen hata olasılığı ölçütüne göre birinci sistem diğer sisteme tercih edilmektedir.
- Fakat, iki sistem karşılaştırılırken sadece güç kullanımı ve hata olasılığının değerlendirilmesi yeterli olmamakta, **sistemlerin bant genişliği**, **maliyeti**, **karmaşıklığı** ve **esnekliği** gibi başka etkilerin de dikkate alınması gerekmektedir.



Şekil 2.3 Örnek iki sayısal haberleşme sistemi için BER-SNR grafiği