

Dr. Sadık YILDIZ

sadikyildiz06@gmail.com

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

2025– ANKARA

SAYISAL HABERLEŞME

5. Bantsınırlı Kanallardan Sayısal İletim

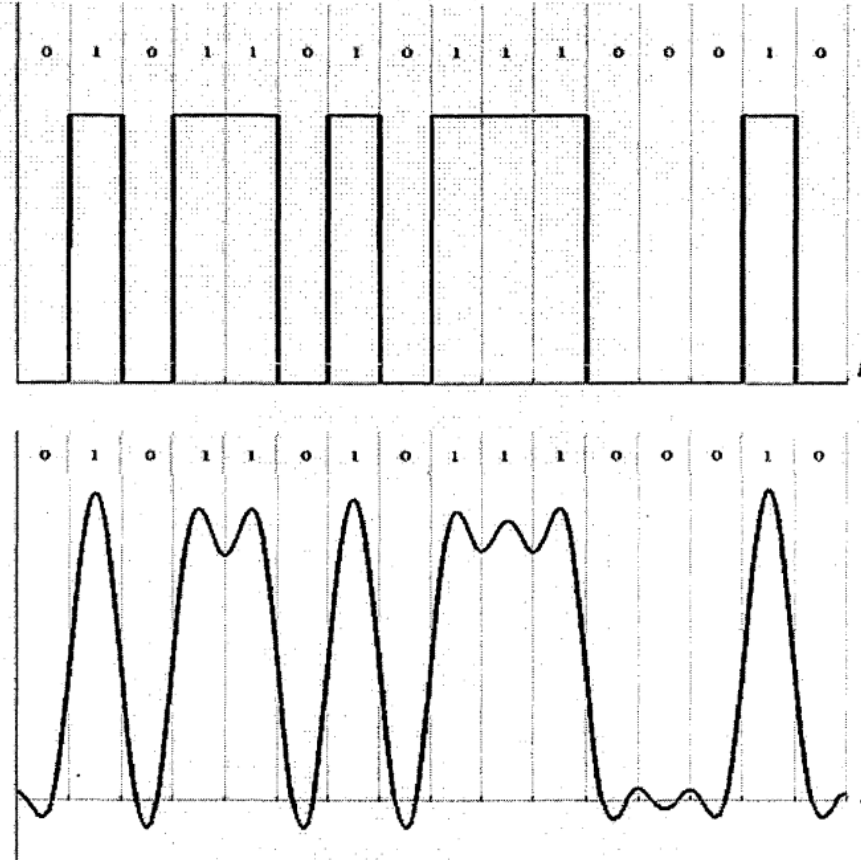
5.3. Darbe Biçimlendirme

- *Bantsınırlı bir haberleşme kanalından* iletim yapıldığında, *iletilen işaretin frekans spektrumu sınırlandırılacağından*, *alıcıda* alınan işaretin *zaman uzayında sınırlı olması mümkün olmamaktadır*.
- Bu nedenle *simgelerarası karışmanın* tam olarak önlenmesi mümkün gözükmemektedir.
- Çoğunlukla *simgelerarası karışmanın* tam olarak önlenmesi yerine, *haberleşme sistemi performansına etkisinin önlenmesi* veya *azaltılması* yeterli olmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

5.3. Darbe Biçimlendirme

- Örnek olarak Şekil 5.9'da tek-kutuplu işaretleme kullanıldığında, bant-sınırlı bir haberleşme kanalının işaret spektrumunu sınırlandırması sonucunda oluşan simgelerarası karışma gösterilmektedir.



Şekil 5.9. İletilen işaret (üstte) ve simgelerarası karışma sonucunda alınan işaret (altta)

SAYISAL HABERLEŞME

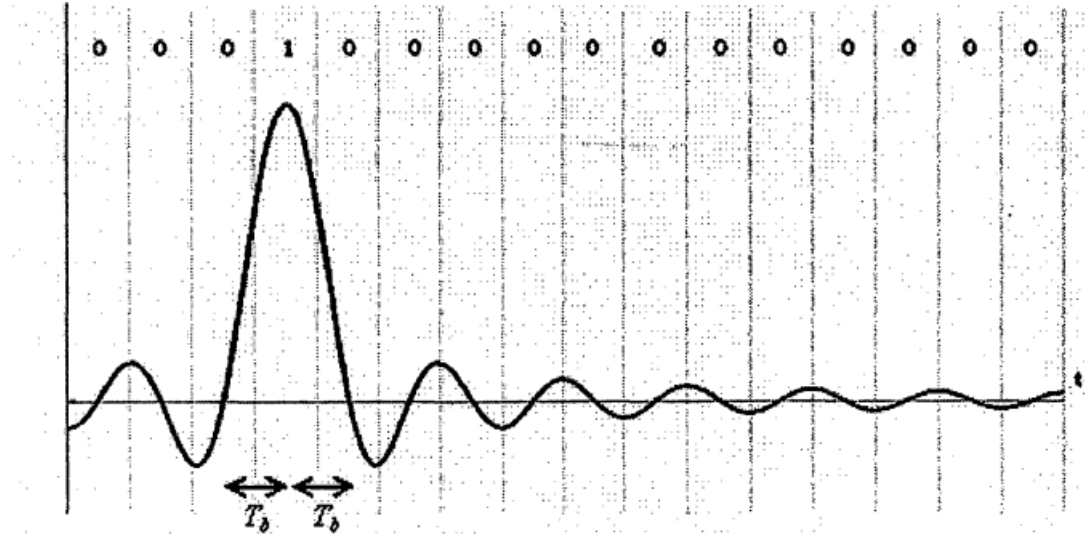
5.3. Darbe Biçimlendirme

- **Simgelerarası karışma** nedeniyle darbelerin komşu zaman dilimlerine taşmasından olabildiğince az etkilenmek için, alıcıda **sembol zaman-dilimlerinin merkez noktasındaki işaret seviyelerine göre çözümleme** yapılabilmektedir.
- **Simgelerarası karışma durumunda**, **sembol zaman-dilimlerinin merkez noktasında komşu zaman dilimlerindeki darbelerin karışma etkisi en düşük seviyede olmaktadır.**
- Çünkü zaman-dilimlerinin merkez noktası her iki komşu zaman-dilimine en uzak mesafede bulunmaktadır.
- Bu nedenle simgelerarası karışmadan daha az etkilenmek için **merkez-noktası sezici** yapısı kullanılabilmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

5.3. Darbe Biçimlendirme

- **Merkez noktası sezici yapısı** kullanıldığında alıcı, her **sembol zaman-diliminin orta noktasındaki işaret seviyesine** göre **çözümleme** yapmaktadır.
- Bu durumda **simgelerarası karışma etkisinin olmaması** için **iletile darbe biçiminin komşu zaman dilimlerinin orta noktasında sıfır değerini alması yeterli olmaktadır**.
- Şekil 5.10'da gösterilen sinc(.) darbesi, bu özelliği sağlayan örnek bir darbe biçimidir.



Şekil 5.10. Alıcı, bit-zaman diliminin orta noktasındaki işaret değerine göre karar verdiği takdirde simgelerarası karışma etkisi göstermeyen sinc(.) darbesi iletimi.

SAYISAL HABERLEŞME

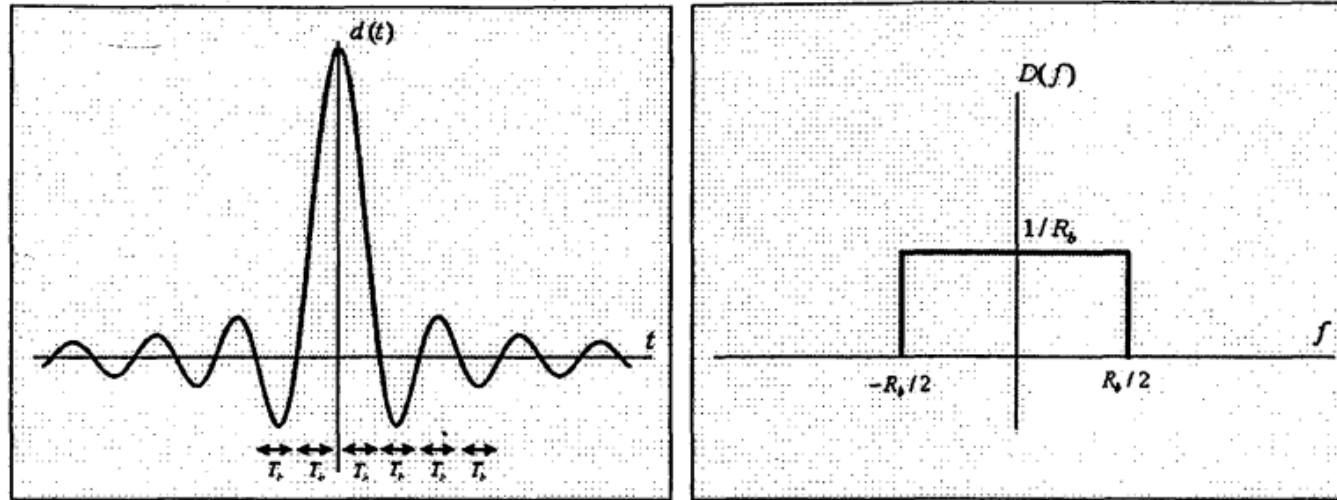
5.3. Darbe Biçimlendirme

- İletim için $d(t) = \text{sinc}(t/T_b)$ şeklinde tanımlanmış bir darbe biçimi kullanıldığı taktirde, Şekil 5.10'da görüldüğü gibi bu işaret *komşu bit zaman dilimlerinin orta noktasında sıfır değerini almakta*.
- İdeal şartlar altında merkez-noktası sezicide simgelerarası karışma etkisi gözlenmemektedir.
- Bu nedenle, tabanbant işaretleşmesinde $d(t) = \text{sinc}(t/T_b)$ şeklinde darbeler kullanıldığında, alıcıda alınan *işaretin bit-zaman diliminin orta noktasındaki değerine göre çözümleme* yapılarak *simgelerarası karışmanın sistem performansına etki etmesi önlenebilmektedir*.
- Bu yaklaşım, **Nyquist'in sıfır ISI** kriteri olarak bilinmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

5.3. Darbe Biçimlendirme

- **İkili iletim oranı** R_b bit/s şeklinde gösterildiğinde, **bit zaman-dilimi** $T_b = 1/R_b$ olarak bulunmaktadır.
- İletim için $d(t) = \text{sinc}(t/T_b)$ biçiminde bir darbe kullanıldığında, Şekil 5.11'de görüldüğü gibi, **bu darbenin frekans spektrumu** $R_b/2$ frekansına sınırlandırılmış dikdörtgensel bir spektrum biçiminde olmaktadır.
- **Darbe biçimlendirme sayesinde iletim bant genişliğinin azaltılabildiği görülmektedir**
- T_b genişliğinde dikdörtgensel darbenin **tabanbant bant genişliği** $1/T_b = R_b$, olmaktadır.

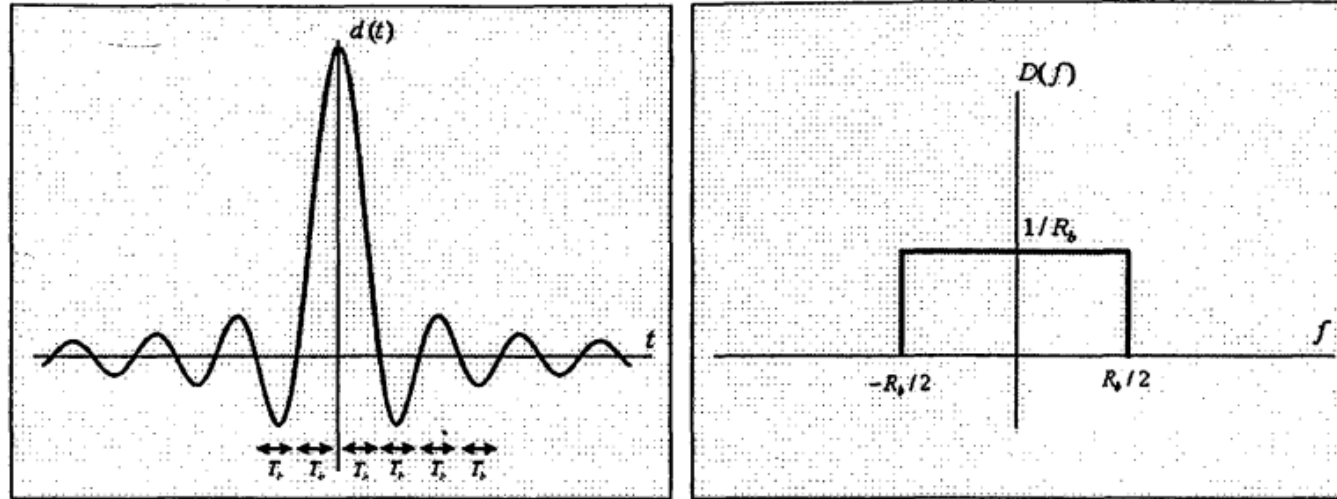


Şekil 5.11. $\text{sinc}(t/T_b)$ biçimindeki darbe ve frekans spektrumu.

SAYISAL HABERLEŞME

5.3. Darbe Biçimlendirme

- $d(t) = \text{sinc}(t/T_b)$ biçiminde bir darbe kullanıldığında $R_b/2$ Hz bant genişliği üzerinden R_b bit/s oranında sayısal iletim gerçekleştirilebilmektedir.
- $d(t) = \text{sinc}(t/T_b)$ biçimindeki darbe sonsuz uzunlukta olacağından, pratikte bu darbenin kullanılması mümkün olmamaktadır.
- Bu nedenle, R_b bit/s oranında sayısal iletim için gerekli $R_b/2$ Hz bant genişliği, teorik minimum bant genişliği olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 5.11. $\text{sinc}(t/T_b)$ biçimindeki darbe ve frekans spektrumu.

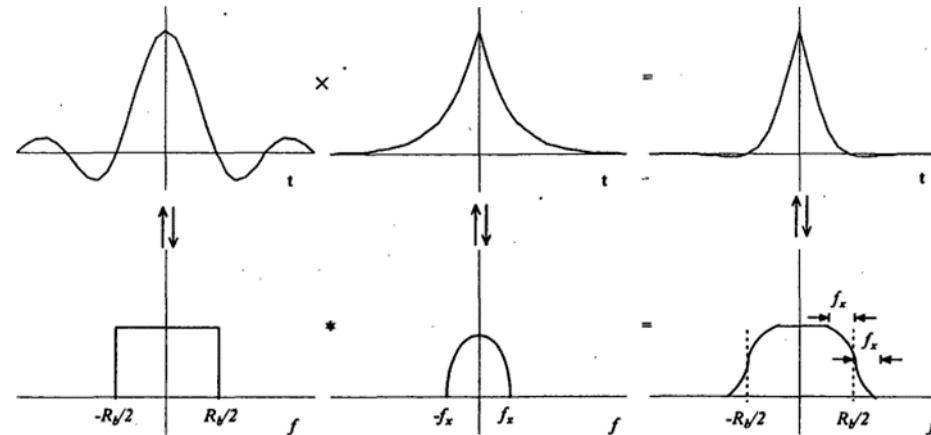
5.3. Darbe Biçimlendirme

- Uygulamada $\text{sinc}(t/T_b)$ biçimindeki bir darbenin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi mümkün olmamaktadır.
- Ayrıca $\text{sinc}(t/T_b)$ biçimindeki darbe *göreceli olarak yavaş sönümlendiğinden*, pratikte verici veya alıcıda yaşanacak bir *zamanlama (senkronizasyon)* hatasında önemli oranda simgelerarası karışma meydana gelebilmektedir.
- $\text{sinc}(t/T_b)$ darbesi $1/t$ ile *orantılı olarak sönümlendiğinden*, herhangi bir *zamanlama kaymasında* alıcının *örneklediği değerde yüksek bir genlik görülebilmektedir*.
- Bu nedenle uygulamada $\text{sinc}(t/T_b)$ darbesinin sıfır geçiş özelliğini koruyan fakat daha hızlı sönümlenen ve ayrıca zamanda sınırlı olan bir darbe şekli kullanılmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

5.3. Darbe Biçimlendirme

- Uygulamada kullanılan darbe biçiminin komşu zaman dilimlerinin merkez noktalarında sıfır genişliğinde olması istenmektedir.
- Ayrıca, zamanlama hatalarına karşı darbe genişliğinin hızlı sönümlenmesi istenmektedir.
- $\text{sinc}(t/T_b)$ biçimindeki darbe ilk özelliği sağlamakta, fakat ikinci özelliği sağlamamaktadır.
- Bu nedenle uygulamada $\text{sinc}(t/T_b)$ biçimindeki darbenin **sembol periyodu** katlarındaki **sıfır geçişlerine** sahip, fakat **daha hızlı sönümlenen** bir darbe biçimi hedeflenmektedir.
- İstenen özellikleri sağlayan darbe biçimi, teorik olarak, Şekil 5.12'de gösterildiği gibi, $\text{sinc}(t/T_b)$ biçimindeki darbenin hızlı sönümlenen tekdüze bir fonksiyon ile çarpılması sonucu elde edilebilmektedir.



Şekil 5.12. Teorik olarak istenen darbe şeklinin oluşturulması.

SAYISAL HABERLEŞME

5.3. Darbe Biçimlendirme

- Bu yaklaşım sadece teorik analiz sağlamaktadır, çünkü pratikte $\text{sinc}(t/T_b)$ darbesinin elde edilmesi mümkün olmamaktadır.
- Bu işlem *frekans uzayında* $\text{sinc}(t/T_b)$ darbesinin *frekans spektrumu* ile *sönümleme fonksiyonu* *spektrumunun* *konvolüsyonuna* karşılık gelmektedir.
- Kullanılan sönümleme fonksiyonu *gerçek değerli* ve *çift simetrik* olduğundan, bu işaretin *frekans spektrumu* da *gerçek ve çift simetrik* olmaktadır.
- Bu nedenle biçimlendirilmiş darbenin spektrumunda, Şekil 5.12'de görüldüğü gibi $R_b/2$ frekansına göre *tek simetri* oluşmaktadır.
- İstenen özellikleri sağlayan biçimlendirilmiş darbenin spektrumu $R_b/2$ frekansından daha geniş bir bandı kapsamaktadır.
- Biçimlendirilmiş darbenin spektrumu tek simetriden dolayı $R_b/2 - f_x$ frekansında azalmaya başlamakta ve $R_b/2 + f_x$ frekansında sifıra ulaşmaktadır.
- Bu iki frekans değeri arasındaki bant, *azalma bandı* olarak adlandırılmaktadır.
- Bu özellikte bir darbenin, $1 \leq k \leq 2$ olmak üzere, $kR_b/2$ bant genişliği gerektirdiği **Nyquist** tarafından gösterilmiştir.
- Bu nedenle, bu özellikteki darbeler **Nyquist darbesi**, bu şekilde darbe biçimlendirmesinin kullanıldığı haberleşme kanalları da **Nyquist kanalı** olarak adlandırılmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

5.3. Darbe Biçimlendirme

- Uygulamada ise en yaygın kullanılan darbe biçimlendirme yöntemi yükseltilmiş kosinüs filtrelemedir. Yükseltilmiş kosinüs filtrenin frekans yanıtı şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$H_{yk}(f) = \begin{cases} T_b & , \quad 0 \leq |f| \leq \frac{1-\beta}{2T_b} \\ T_b \cos^2 \left[\frac{\pi T_b}{2\beta} \left(|f| - \frac{1-\beta}{2T_b} \right) \right] & , \quad \frac{1-\beta}{2T_b} \leq |f| \leq \frac{1+\beta}{2T_b} \\ 0 & , \quad |f| \geq \frac{1+\beta}{2T_b} \end{cases}$$

- Bu ifadede β , azalma faktörü olarak adlandırılmakta ve $0 \leq \beta \leq 1$ aralığında değer almaktadır.
- **Teorik minimum bant genişliği** $R_b/2$ olmak üzere, **fazlalık bant genişliği** f_x ile gösterildiğinde; **azalma faktörü**, **fazlalık bant genişliğinin teorik minimum bant genişliğine** oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle, azalma faktörü şu şekilde ifade edilir.

$$\beta = \frac{f_x}{R_b/2} , 0 \leq \beta \leq 1$$

SAYISAL HABERLEŞME

5.3. Darbe Biçimlendirme

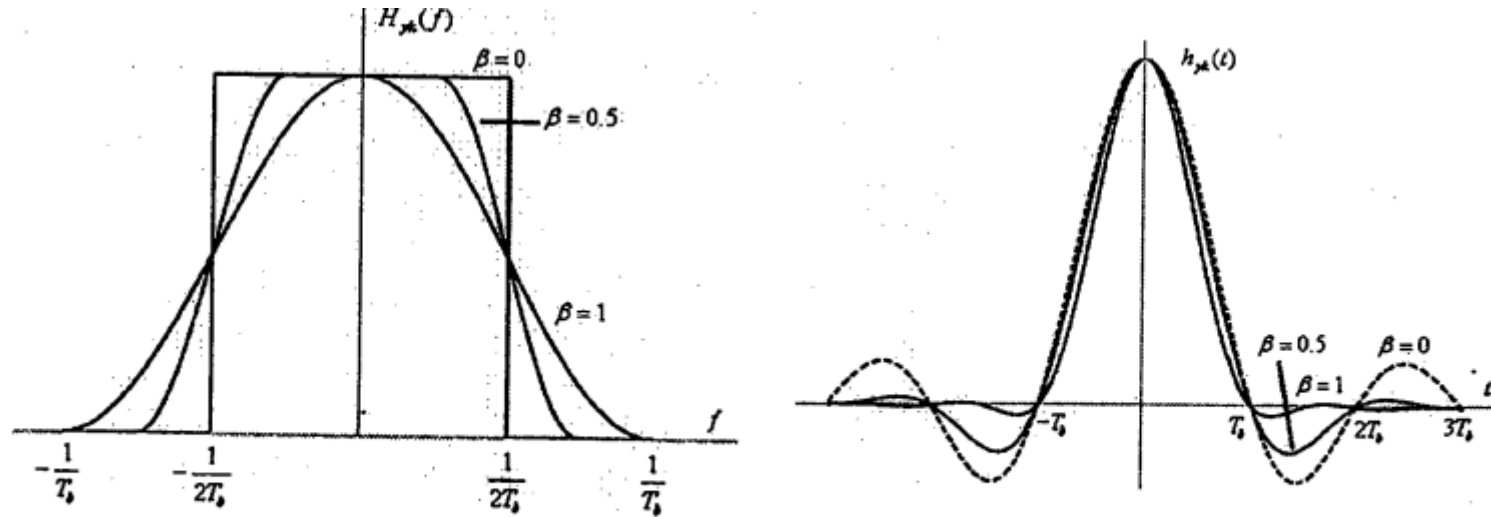
- Pratik haberleşme sistemlerinde genelde 0.10 ile 0.35 arasında değişen azalma faktörleri β kullanılmaktadır.
- Örneğin, *0.35 azalma faktörü olan bir darbe biçimi*, *ideal sinc(.) darbelerinin* sağladığı minimum bant genişliğinden *%35 daha büyük bir frekans bandını kapsamaktadır*.
- Yükseltilmiş kosinüs filtresinin dürtü yanıtı ise şu şekilde ifade edilir.

$$\text{➤ } h_{yk}(t) = \text{sinc}(\pi t/T_b) \frac{\cos(\pi \beta t/T_b)}{1 - \frac{4\beta^2 t^2}{T_b^2}}$$

SAYISAL HABERLEŞME

5.3. Darbe Biçimlendirme

- Değişik azalma faktörleri için yükseltilmiş kosinüs frekans spektrumları ve darbe biçimleri Şekil 5.13'de gösterilmektedir.
- *Yükseltilmiş kosinüs darbesinin* spektrumu *sıfır azalma faktörü için dikdörtgensel biçimde*, *birim azalma faktörü için ise tam bir yükseltilmiş kosinüs biçiminde* olmaktadır.



Şekil 5.13. Yükseltilmiş kosinüs süzgecinin frekans (solda) ve dürtü (sağda) yanıtı.

SAYISAL HABERLEŞME

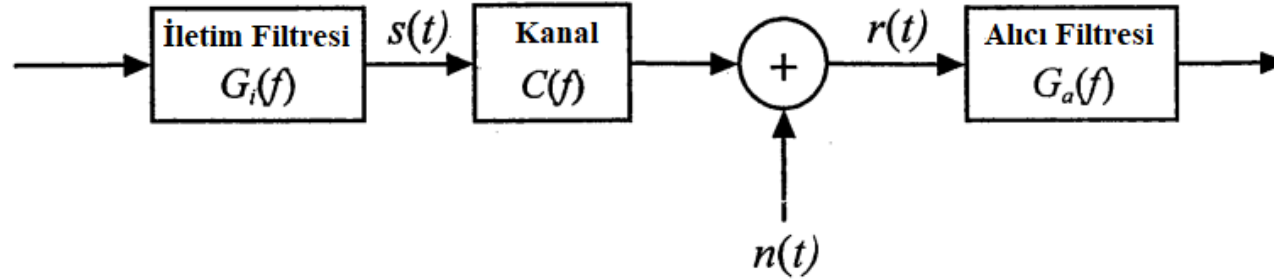
5.3. Darbe Biçimlendirme

- *Yükseltilmiş kosinüs spektrumunun uygun biçiminden dolayı* yaklaşık olarak *istenen frekans yanıtını verecek* filtrelerin tasarlanması mümkün olmaktadır.
- Uygulamada *analog filtreler* kullanılabileceği gibi, *sonlu dürtü yanıtı (FIR) veya sonsuz dürtü yanıtı (IIR) sayısal filtreler de kullanılabilmektedir.*
- Fakat, istenen yanıt, en kolay ve en yaklaşık şekilde FIR filtre kullanılarak elde edilebilmektedir.
- Bu nedenle uygulamada çoğunlukla FIR filtre kullanımı tercih edilmekte.
- Sayısal filtrelerin kullanımı mümkün olmadığında analog filtre kullanılmaktadır.
- Filtrenin derecesi arttıkça, filtrenin frekans yanıtı yükseltilmiş kosinüs yanıtına yaklaşmaktadır.
- *Düşük azalma faktörleri, daha düşük iletim bant genişliği sağladığı halde, düşük azalma faktörlerinde yükseltilmiş kosinüs süzgecinin frekans yanıtı, ideal alçak geçiren filtrenin frekans yanıtına yaklaşmaktadır.*
- Uygulamada ideal bir filtre yanıtı elde edilememesinden dolayı, düşük azalma faktörlerinde daha fazla simgelerarası karışma meydana gelmektedir.
- Yükseltilmiş kosinüs filtresinin yanıtı kullanılarak, vericide darbe biçimlendirme yapılabilmekte ve bu sayede simgelerarası karışma etkisi azaltılabilmektedir. ,
- Daha iyi başarımlar sağlanabildiği tespit edildiğinden, uygulamada çoğunlukla darbe biçimlendirme işlevi verici ve alıcı arasında eşit olarak paylaştırılmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

5.3. Darbe Biçimlendirme

- Darbe biçimlendirme işlevinin verici ve alıcı arasında paylaşılması için, Şekil 5.14'de gösterildiği gibi, verici ve alıcıda birer filtre kullanılabilmektedir.



Şekil 5.14. Darbe biçimlendirme işlevinin verici ve alıcı arasında paylaşılması.

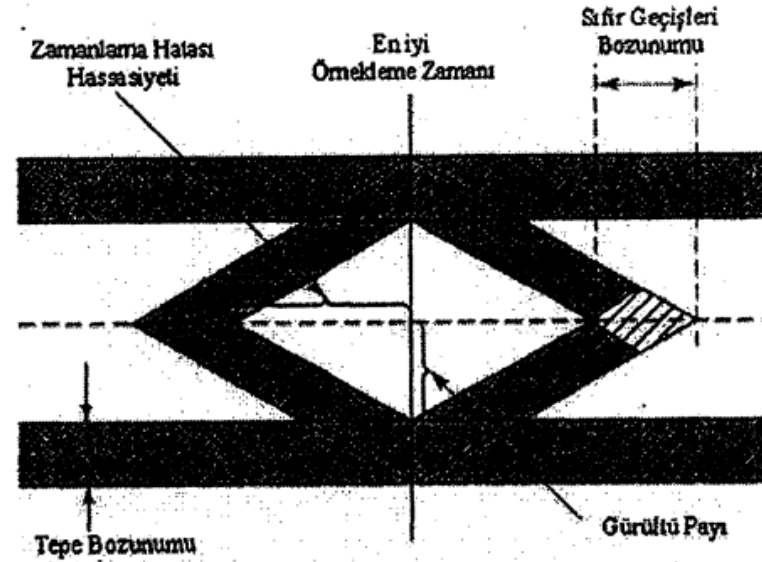
- Bu durumda, iki filtre haberleşme sisteminde seri bağlı konumda bulunmaktadır.
- Darbe biçimlendirme işlevi, iletim filtresi ve alıcı filtresi arasında paylaşılacağından, iletim filtresi yanıtı ile alıcı filtresi yanıtının **çarpımı yükseltilmiş kosinüs yanıtına** eşit olmaktadır.
- Bu nedenle iletim süzgeci yanıtı ve alım süzgeci yanıtı şu şekilde ifade edilir.
 - $G_i(f) G_a(f) = H_{yk}(f)$
- Yükseltilmiş kosinüs yanıtı, iletim ve alıcı filtrelerine eşit olarak dağıtıldığında, iletim ve alıcı filtrelerinin genlik yanıtları şu şekilde ifade edilir.

$$➤ |G_i(f)| = |G_a(f)| = \sqrt{|H_{yk}(f)|}$$

SAYISAL HABERLEŞME

5.4. Göz Diyagramı

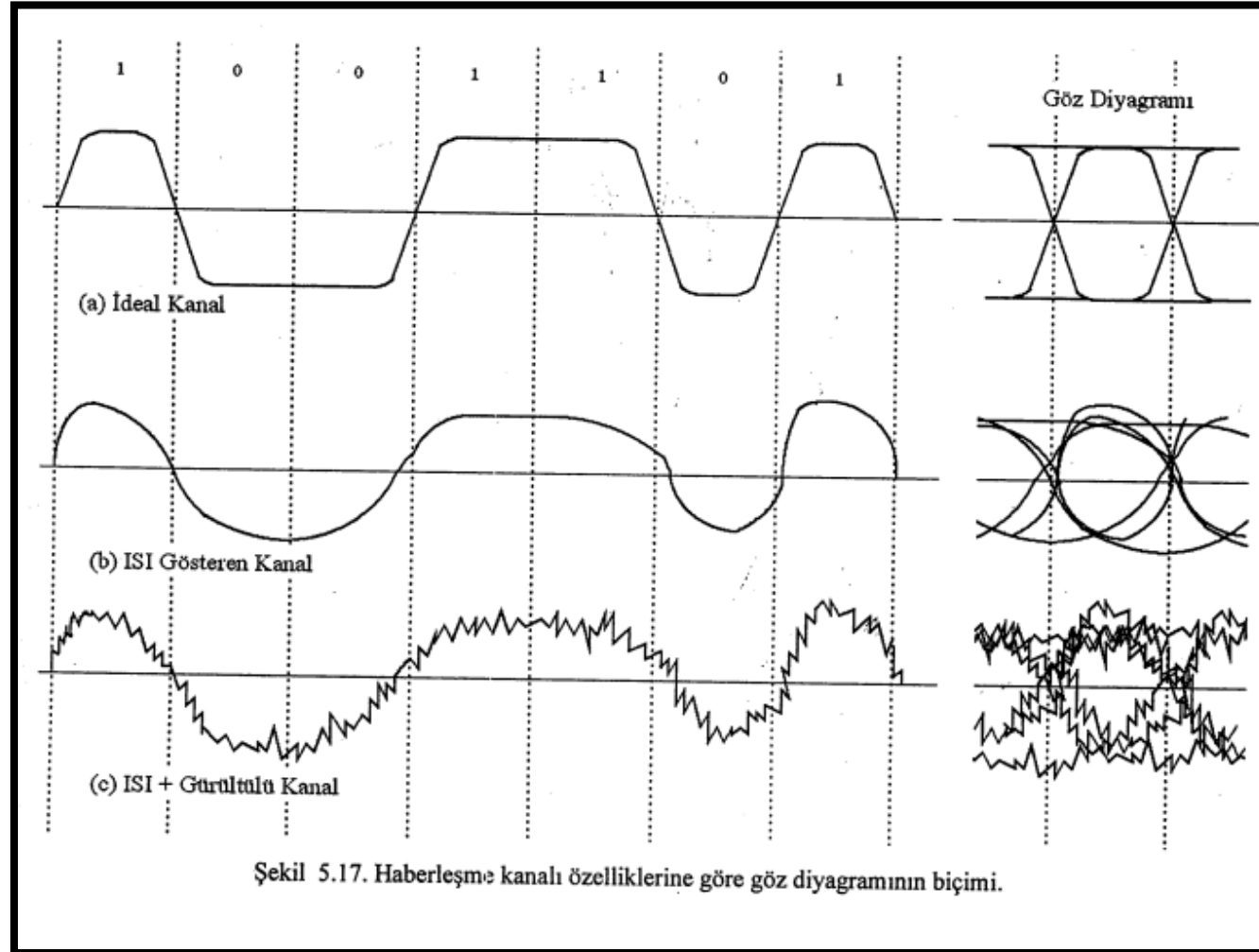
- Bir haberleşme sistemindeki **simgelerarası karışma** ve **gürültü miktarı** osiloskopta gözlenebilmektedir.
- **Alınan işaretin genliği** osiloskopta düşey ekseninde yaklaşık olarak **sembol oranından** ($R_s = 1/T_s$) **biraz büyük bir yatay süpürme oranında görüntülendiğinde göz diyagramı** elde edilebilmektedir.
- Bu isim, oluşan şeklin insan gözüne olan benzerliğinden dolayı konulmuştur.
- Göz diyagramının belirttiği sistem özellikleri Şekil 5.16'da özetlenmektedir.
- Simgelerarası karışma, sıfır geçişlerinin bozunumuna neden olmakta ve gözün kapanmasına yol açtığından eşzamanlama (senkronizasyon) hatalarına karşı hassasiyeti arttırmakta ve gürültü payını azaltmaktadır.



Şekil 5.16. Göz diyagramı ve belirtileri.

SAYISAL HABERLEŞME

5.4. Göz Diyagramı



SAYISAL HABERLEŞME

5.4. Göz Diyagramı

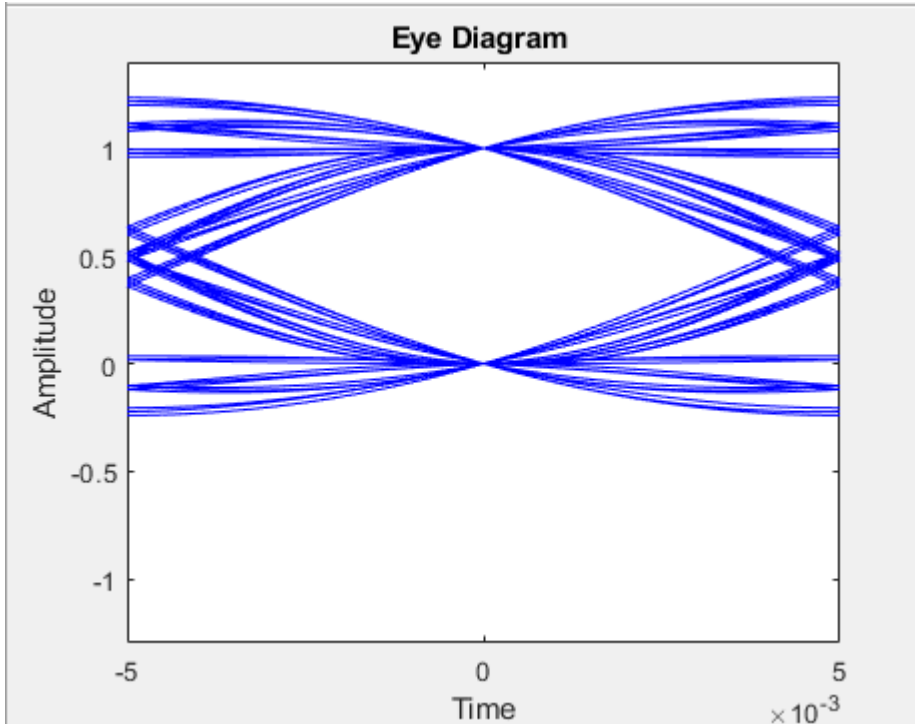
- **Örnek 5.4.** Matlab kullanarak, azalma faktörü 0.5 olan yükseltilmiş kosinüs kanalından ikili ve dört seviyeli iletim yapıldığında elde edilen göz diyagramlarını oluşturunuz.

```
1 - fd = 100;           % Veri hızı (bps)
2 - fs = 10000;        % Örnekleme frekansı (Hz)
3 - P = 100;           % Bit sayısı
4 - M = 2;             % İkili iletim (Binary)
5
6 % Rastgele veri üretimi (0 ve 1 değerlerinden oluşan)
7 - xmit = randi([0 M-1], P, 1);
8
9 - azalma = 0.5;      % Rolloff faktörü (roll-off)
10 - gecikme = 3;      % Süzgeç gecikmesi (symbol duration cinsinden)
11
12 % Yükseltilmiş kosinüs filtreleme
13 - rcv = rcosflt(xmit, fd, fs, 'fir/normal', azalma, gecikme);
14
15 - iletgecik = gecikme * (fs / fd) + 1; % Filtrenin sembol gecikmesi örnek cinsinden
16
17 % İletim gecikmesini kesip sinyali düzeltme
18 - rcv1 = rcv(iletgecik:end - (iletgecik - 1), :);
19
20 - N = fs / fd;      % Her bir sembol kaç örnekle temsil ediliyor
21
22 % Göz diyagramını çiz
23 - eyediagram(rcv1, N, 1/fd);
```

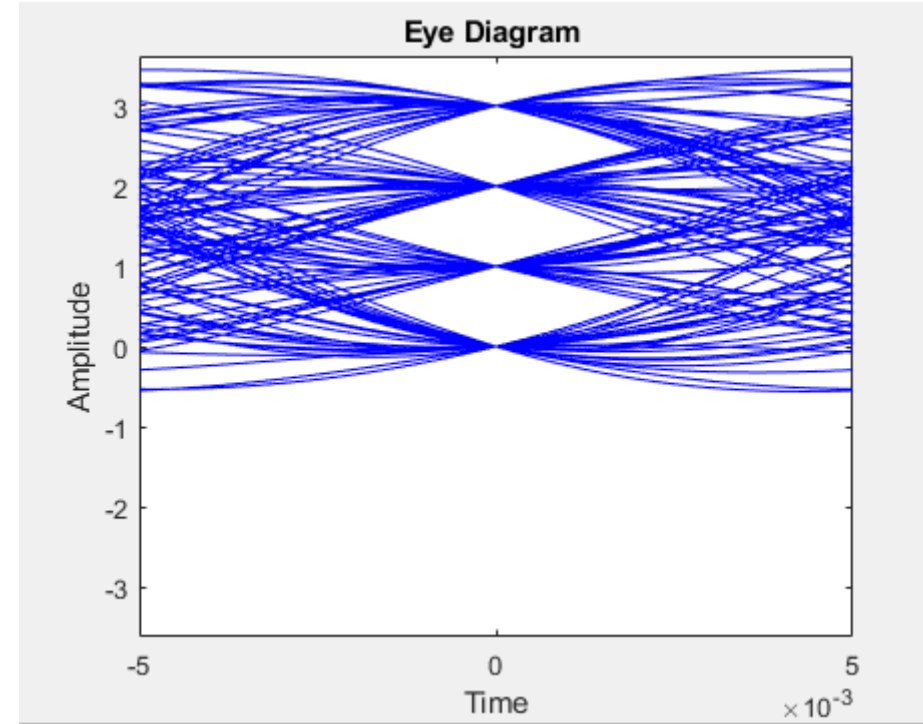
SAYISAL HABERLEŞME

5.4. Göz Diyagramı

- Örnek 5.4.
- Bu program M=2 ve M=4 ile çalıştırılarak iki ile dört seviyeli iletim için göz diyagramı aşağıdaki gibi gösterilmektedir.



M=2

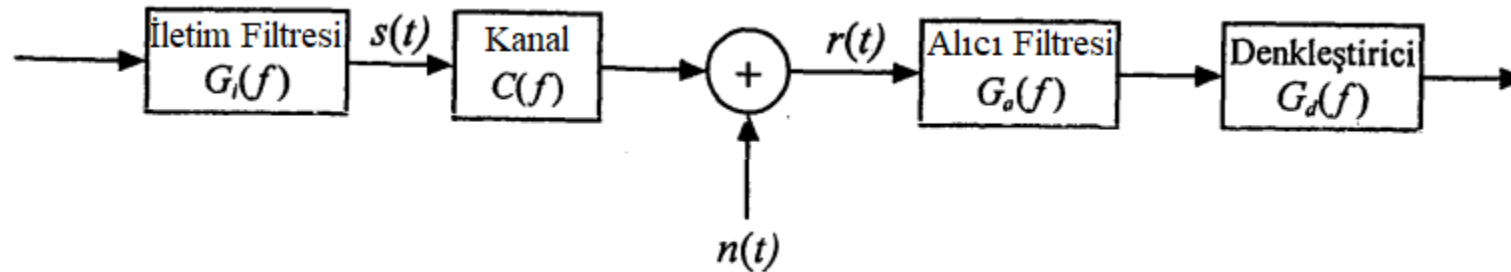


M=4

SAYISAL HABERLEŞME

5.5. Denkleştirme

- *Darbe biçimlendirme*, bantlı fakat bozunumsuz bir kanal üzerinden iletim yapıldığında *simgelerarası* karışmaya karşı etkili olabilmektedir.
- Ancak çoğu *gerçek haberleşme sisteminde* (özellikle *kablosuz iletimde*), haberleşme kanalının *filtreleme etkileri* veya *yansıma sonucunda oluşan çok-yolluluk* gibi etkilerinden dolayı *frekansa bağlı olarak genlik veya faz bozunumu meydana gelmektedir*.
- Haberleşme kanallarında meydana gelen bozunum, bir haberleşme kanalından diğer haberleşme kanalına değişebileceği gibi aynı haberleşme kanalında zamanla da değişebilmektedir.
- *Kanalın yol açtığı bozunumun alıcıda düzeltilmesi* işlemi *denkleştirme* olarak adlandırılmaktadır.
- Denkleştirme işlemi genelde Şekil 5.19'da gösterildiği gibi alıcı filtresinden sonra yapılmaktadır.



Şekil 5.19. Denkleştirici kullanan bir haberleşme sisteminin blok diyagramı.

SAYISAL HABERLEŞME

5.5. Denkleştirme

- **En temel denkleştirici yapısı**, *simgelerarası karışma (ISI)* etkisini *tersine çevirerek* alıcıda *ideal (bozunumsuz) kanalın frekans yanıtını geri oluşturmaya* çalışmaktadır.
- Simgelerarası karışma meydana geldiğinde, alıcıda örnekleme anında (merkez sezicisi için sembol zaman diliminin orta noktasında) elde edilen işaret değeri, istenen sembol değeri (örnekleme zamanındaki, ISI olmayan sembol değeri) ile komşu sembollerin ISI miktarına bağlı olarak değişen katsayılarla ölçeklenmiş şekillerinin toplamına eşit olmaktadır. Dolayısıyla alıcıda k anında elde edilen işaret değeri şu şekilde ifade edilmektedir.

$$y_k = a_k + \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_i a_i \quad , \quad i \neq k$$

SAYISAL HABERLEŞME

5.5. Denkleştirme

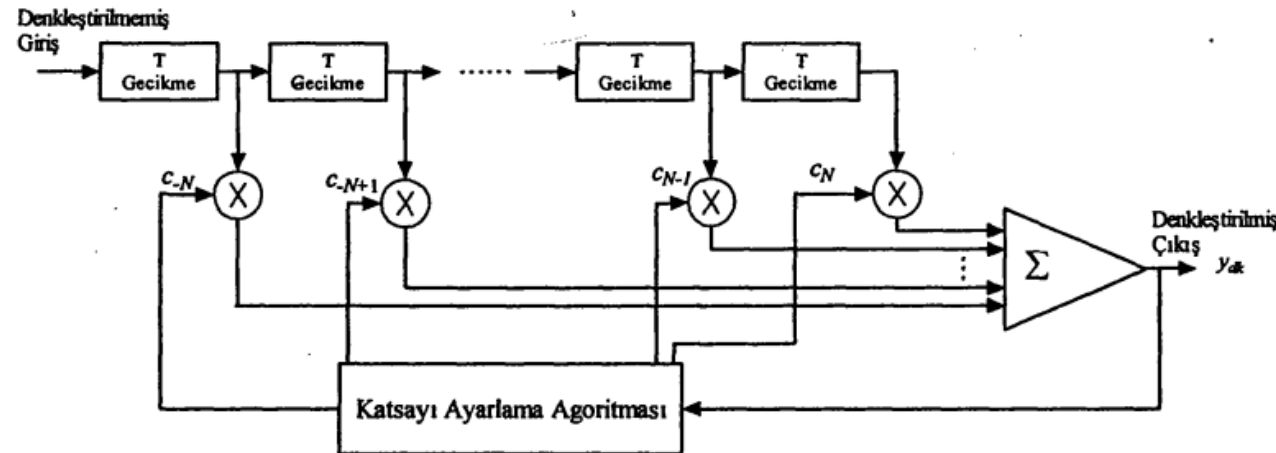
$$y_k = a_k + \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_i a_i, \quad i \neq k$$

- Burada y_k alıcıda k anında elde edilen işaret değerini ve a_k bilgi dizisinin k ıncı değerini göstermektedir.
- Komşu sembol değerleri a_i ve bu sembollerin (kanal nedeniyle oluşan) ISI etkisi c_i ile gösterilmektedir.
- Sembol periyodu T_s olarak gösterildiğinde $y_k = y(t)|_{t=kT_s} = y(kT_s)$ olmaktadır.
- Bu denklemde ISI etkisi sonsuz bir toplam ile gösterilmekle beraber, uygulamada sonsuz bir dizi olmayacağı gibi tüm terimlerin (özellikle uzak sembollerin) dikkate almaya değecek bir ISI etkisi olmayacaktır.
- Bu nedenle denklemde verilen ifadedeki sonsuz toplam, sonlu bir toplam ile değiştirilebilmektedir.
- Kanalın frekans yanıtı (dolayısıyla c , katsayıları) biliniyor veya bulunabiliyor ise alıcıda bu etkinin tersine çevrilmesi mümkün olabilmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

5.5. Denkleştirme

- Simgelerarası karışmanın tamamen giderilmesi, yani simgelerarası karışmanın sıfırlanması (veya sıfıra zorlanması), *sıfır-zorlayıcı doğrusal denkleştirme* olarak adlandırılmaktadır.
- Bu işlemin sayısal biçimde gerçekleştirilmesi için Şekil 5.20'de gösterilen, *sonlu dürtü yanıtı (FIR)* filtre yapısı şeklindeki dallı gecikme hattı (enine süzgeç) yapısı kullanılabilmektedir.
- Bu durumda simgelerarası karışmanın engellenebilmesi için çarpım katsayılarının (c_i) belirlenmesi gerekmektedir.
- Denkleştirme işlemi tipik olarak *doğrusal denkleştirme* ve *doğrusal olmayan* (karar geribeslemeli) denkleştirme olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.



Şekil 5.20. Dallı gecikme hattı (enine süzgeç) yapısı.

SAYISAL HABERLEŞME

5.5. Denkleştirme

5.5.1. Doğrusal Denkleştirme

Şekil 5.20’de gösterilen dallı gecikme hattı yapısındaki sisteme uygulanan denkleştirilmemiş giriş (kanal tarafından bozulmuş darbe işareti) $x(t)$ ile gösterildiğinde, sistem çıkışı

$$y(t) = \sum_{n=-N}^N c_n x(t - nT) \quad (5.13)$$

olarak elde edilmektedir. Denkleştirici çıkışı sembol oranında örneklendiğinde,

$$y_k = y(t)|_{t=kT_s} = y(kT_s) = \sum_{n=-N}^N c_n x(kT_s - nT) \quad (5.14)$$

bulunmaktadır. Denkleştiricideki dalların gecikme süreleri sembol periyoduna eşit olacak şekilde ayarlandığında, yani $T = T_s$ alındığında, oluşan çıkış

$$y_k = \sum_{n=-N}^N c_n x_{k-n}, \quad k = -N, \dots, 0, \dots, N \quad (5.15)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada $x_k = x(t)|_{t=kT_s} = x(kT_s)$ şeklinde, k anında denkleştiriciye verilen giriş örneğini göstermektedir. Denkleştiricide toplam $2N+1$ adet denkleştirici katsayısı bulunduğundan, bu katsayılar ile çıkışın sadece $2N+1$ değeri kontrol edilebilmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

5.5. Denkleştirme

5.5.1. Doğrusal Denkleştirme

Gösterim kolaylığı için $\mathbf{y}_k$, $\mathbf{c}$ ve $\mathbf{x}$ matrisleri

$$\mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} y_{-N} \\ \vdots \\ y_0 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}, \mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_{-N} \\ \vdots \\ c_0 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_0 & x_{-1} & x_{-2} & \cdots & x_{-2N+1} & x_{-2N} \\ x_1 & x_0 & x_{-1} & \cdots & x_{-2N+2} & x_{-2N+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & x_{N-1} & x_{N-2} & \cdots & x_{-N+1} & x_{-N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{2N} & x_{2N-1} & x_{2N-2} & \cdots & x_1 & x_0 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

şeklinde tanımlandığında denkleştirici çıkışı

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{x}\mathbf{c} \quad (5.17)$$

olarak matris biçiminde gösterilebilmektedir.

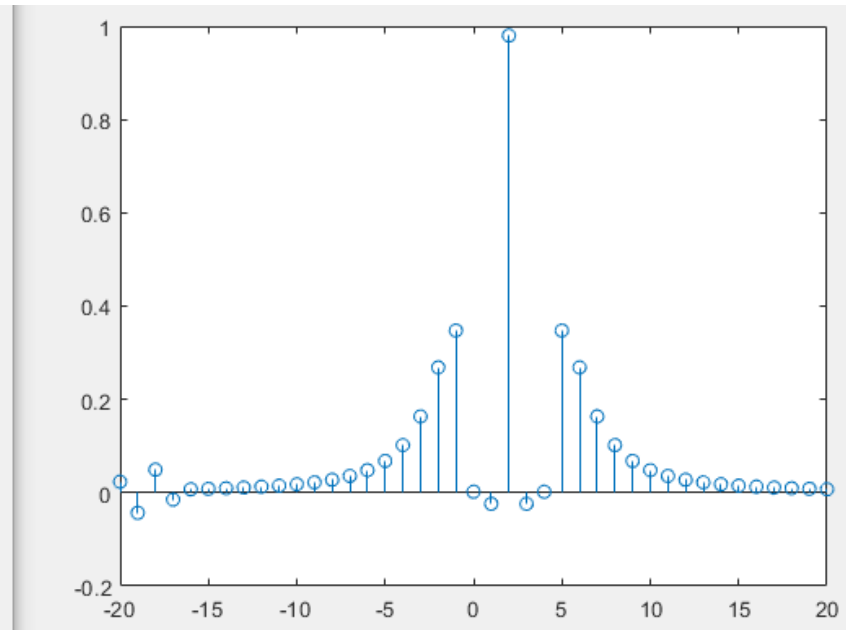
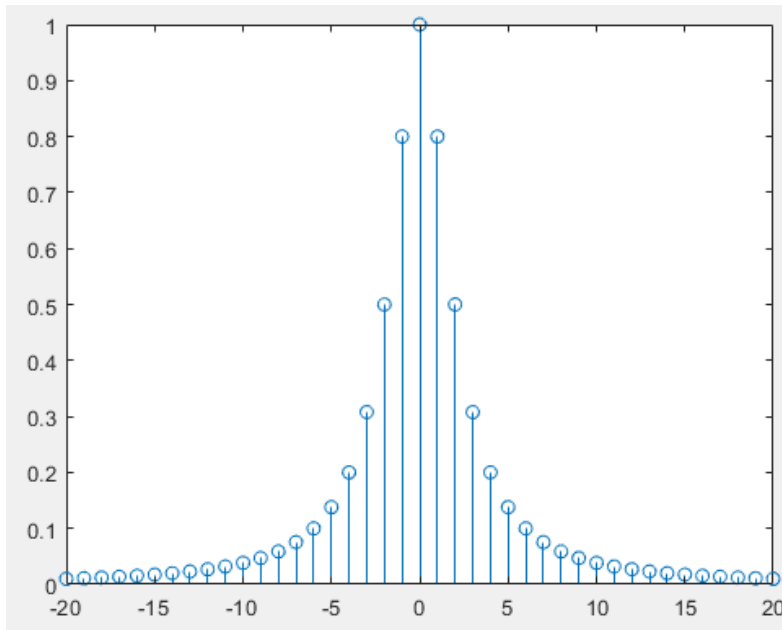
SAYISAL HABERLEŞME

5.5. Denkleştirme

5.5.1. Doğrusal Denkleştirme

➤ Örnek 5.5 (Matlab)

```
1 - n = - 20:20; % örnek aralığı
2 - c = [2.38 -7 9.8 -7 2.38]; % süzgeç katsayıları
3 - xn=1./(1+(n/2).^2); % kanal tarafından bozulmuş işaret
4 - yn=filter(c,1,xn); % denkleştirici çıkışı
5 - stem (n,xn); figure; stem (n,yn);
```



SAYISAL HABERLEŞME

5.5. Denkleştirme

5.5.1. Doğrusal Denkleştirme

- Sıfır-zorlayıcı denkleştiricinin önemli bir eksikliği, toplanır gürültünün (AWGN) dikkate alınmamasıdır.
- Bunun sonucunda denkleştiricinin, gürültüyü ciddi oranda arttırma olasılığı bulunmaktadır.
- Kanalin düşük frekans yanıtına sahip olduğu bir frekans bölgesinde, denkleştirici yüksek bir kazanç vererek toplam frekans yanıtını dengelemeye çalışmakta ve bunun sonucunda bu frekans bölgesindeki gürültü miktarı arttırılmaktadır.
- Bu nedenle tek başına sıfır ISI şartı yerine uygulamada çoğunlukla, ISI ile beraber AWGN etkisinin en aza indirgenmesi yaklaşımı tercih edilmektedir.
- Bu durumda, toplam ISI ve AWGN hatasının en aza indirgenmesi için tipik olarak en küçük ortalama karesel hata ölçütü kullanılmaktadır.
- Bu tip denkleştiriciler, en küçük karesel hata denkleştirici olarak adlandırılmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

5.5. Denkleştirme

5.5.1. Doğrusal Denkleştirme

- **Otomatik denkleştirme** için kullanılan iki temel yaklaşım bulunmaktadır.
- ***Ön-tanımlı denkleştirme yaklaşımında*** verici, (alıcı tarafından bilinen) **bir eğitim dizisi iletmekte**.
- Bu dizi alıcıda oluşturulan dizi ile karşılaştırılmakta ve iki dizi arasındaki farka bağlı olarak denkleştirici katsayıları belirlenmektedir.
- **Uyarlanır denkleştirme** yaklaşımında ise denkleştirici katsayıları sürekli olarak iletilen veriye bağlı olarak ayarlanmaktadır.
- Uyarlanır denkleştirmenin en önemli faydası zamanla değişen kanal özelliklerine ayak uydurulabilmesidir.
- Fakat, haberleşme kanalı çok fazla hataya neden oluyorsa, bu hatalar uyarlama algoritmasının yakınsamasını önleyebileceği için uyarlanır denkleştiricilerin performansı düşebilmektedir.
- Bu nedenle uygulamada çoğunlukla, denkleştirici bir eğitim dizisi ile eğitilmekte ve ilk katsayılar bu diziye göre belirlenmektedir.
- İlk ayarlardan sonra çözümlenen semboller yeteri kadar güvenilir olacağından uyarlamalı denkleştirici, eğitim aşamasından karar-yönelimli çalışmaya geçmektedir.
- Bu aşamadan sonra algılayıcı çıkışında verilen karar ile denkleştirici çıkışı arasındaki fark şeklinde oluşan hata işareti kullanılarak denkleştirici katsayılarının sürekli olarak uyarlaması yapılmaktadır.
- Çoğunlukla algılayıcı çıkışında hata meydana gelme olasılığı oldukça düşük olduğundan bu hataların denkleştiricinin çalışmasına etkisi düşük olmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

5.5. Denkleştirme

5.5.2. Doğrusal Olmayan Denkleştirme

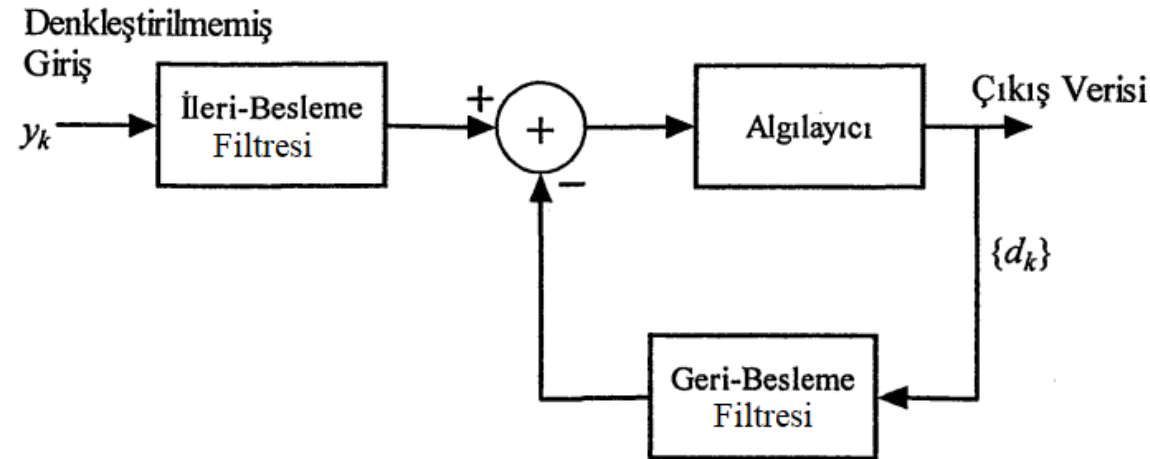
- *ISI etkisinin çok fazla olmadığı haberleşme kanallarında*, örneğin kablolu telefon haberleşmesinde olduğu gibi, doğrusal denkleştiriciler oldukça *iyi başarımları göstermektedir*.
- Fakat *ISI etkisinin çok yüksek olduğu* ve *özellikle haberleşme kanalı spektrumunda sıfırların bulunduğu* durumlarda, örneğin yaygın olarak kablosuz iletimlerde ve gezgin haberleşme sistemlerinde olduğu gibi, *doğrusal denkleştiricilerin başarımları düşmektedir*.
- ***Doğrusal olmayan (karar geribeslemeli) denkleştiriciler***, önceden alınmış semboller için verilen kararları kullanarak, önceden alınan sembollerin o an alınan sembolde meydana getirdiği ISI etkisini yok etmeye çalışmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

5.5. Denkleştirme

5.5.2. Doğrusal Olmayan Denkleştirme

- Şekil 5.22'de blok diyagramı gösterilen *karar geribeslemeli denkleştirici yapısı*, tipik olarak bir adet *ileri-besleme* ve bir adet *geri-besleme* olmak üzere *iki adet filtreden* oluşmaktadır.
- İleri-besleme filtresi genelde kesirli aralıklı bir sonlu dürtü yanıtı (FIR) filtre olup doğrusal bir denkleştirici yapısında olmaktadır.
- Geri-besleme filtresi ise genelde sembol periyodunda çalışan ve ayarlanabilir katsayılarla sahip bir FIR süzgeç yapısında olmaktadır.
- Geri-besleme filtresi aracılığıyla, önceden alınmış ve algılayıcı tarafından kararları verilmiş sembollerin yol açtığı ISI etkisi o andaki sembolden çıkartılmakta, ve bu işlemden sonra algılayıcı tarafından o andaki sembole karar verilmektedir.



Şekil 5.22. Karar geribeslemeli denkleştirici yapısı.

SAYISAL HABERLEŞME

5.6. Alıcıda zamanlama Bilgisinin Elde Edilmesi

- Sayısal iletişimde alıcının, gelen sembolleri doğru zamanda örnekleyebilmesi için verici ile zamanlama (eşzamanlama) uyumunun sağlanması gerekir.
- Eşzamanlama iki temel parametrenin belirlenmesiyle gerçekleştirilir.
 - **Sembol frekansı (veya periyodu):** Alıcının sembolleri doğru aralıklarla örnekleyebilmesi için sembol süresi tahmin edilmelidir. Sistem osilatörlerindeki küçük kaymalar, zaman içinde sembol oranında sapmalara yol açabilir; bu nedenle alıcı-verici senkronizasyonu sürekli sağlanmalıdır.
 - **Sembol fazı:** Bu parametre, her sembol süresi içindeki en uygun örnekleme anını belirler. Genellikle darbe şekilleri ortada tepe yaptığı için, bu noktada örnekleme yapmak simgelerarası girişimi azaltır ve işaret-gürültü oranını iyileştirir.
- **Eşzamanlama Yöntemleri:**
 - Ortak saatle senkronizasyon: Alıcı ve verici aynı ana saatle çalıştırılır. Kablosuz sistemlerde zor, kablolu sistemlerde mümkündür.
 - Saat işareti iletimi: Verici, bilgiyle birlikte saat sinyali de gönderir. Alıcı, saat bilgisini süzgeçle ayıklar. Kolay uygulanabilir ancak bant genişliği ve güç harcar.
 - Öz-eşzamanlama (self-synchronization): Saat bilgisi, doğrudan alınan bilgi sinyalinden çıkartılır. Ek bir saat sinyali iletimine gerek yoktur.

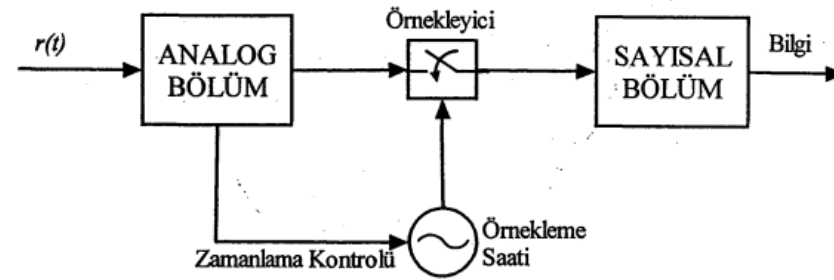
SAYISAL HABERLEŞME

5.6. Alıcıda zamanlama Bilgisinin Elde Edilmesi

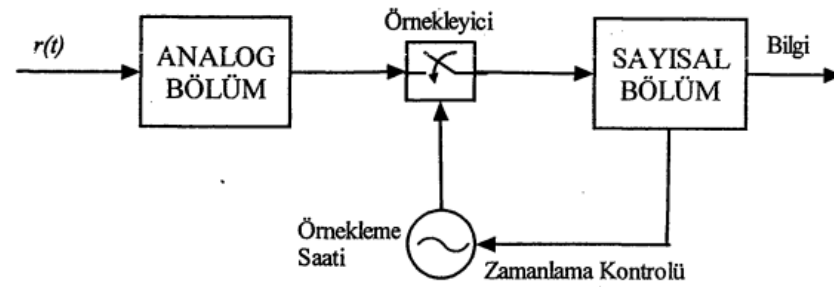
- Eşzamanlama Sistem Türleri:
 - *Analog sistemler*
 - *Karma sistemler*
 - *Sayısal sistemler*
- Analog ve karma sistemler genellikle evre kenetleme döngüsü (PLL) gibi devrelerle çalışır.
- Sayısal sistemler ise modern sistemlerde yaygınlaşmaktadır. Daha düşük güç, daha az maliyet ve hızlı yakınsama sağlar. Özellikle mobil (gezgin) sistemlerde tercih edilir. Sayısal sistemler, zamanlama hatalarını sayısal düzeyde dengeler ve geri beslemeye gerek duymaz.

SAYISAL HABERLEŞME

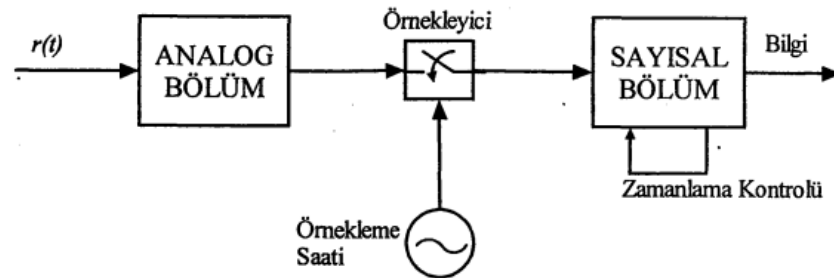
5.6. Alıcıda zamanlama Bilgisinin Elde Edilmesi



a) Analog Eşzamanlama Sistemi



(b) Karma (Analog/Sayısal) Eşzamanlama Sistemi



(c) Sayısal Eşzamanlama Sistemi

Şekil 5.23. Eşzamanlama sistem yapıları.

SAYISAL HABERLEŞME

5.6. Alıcıda zamanlama Bilgisinin Elde Edilmesi

- Alıcıda doğru örnekleme yapabilmek için, alınan işaret önce uyumlu bir filtreden geçirilmelidir.
- Bu filtre, *istenmeyen frekans bileşenlerini bastırarak işaret-gürültü oranını artırır* ve *sadece sembol oranında örnekleme ile karar verilebilmesini sağlar*.
- Bu nedenle, *uyumlu filtre alıcının analog kısmında yer almalı* ve *örnekleme sembol oranında yapılmalıdır*.
- Bu durum analog veya karma eşzamanlama sistemleri için uygundur.
- *Sayısal sistemlerde*, zamanlama hataları *dijital olarak düzeltildiği için*, **örnekleme** *mutlaka sembol oranından daha yüksek (örneğin 2 katı) yapılır*.
- Bu sayede, analog süzgeç yerine sayısal filtre kullanılabilir.

SAYISAL HABERLEŞME

5.6. Alıcıda zamanlama Bilgisinin Elde Edilmesi

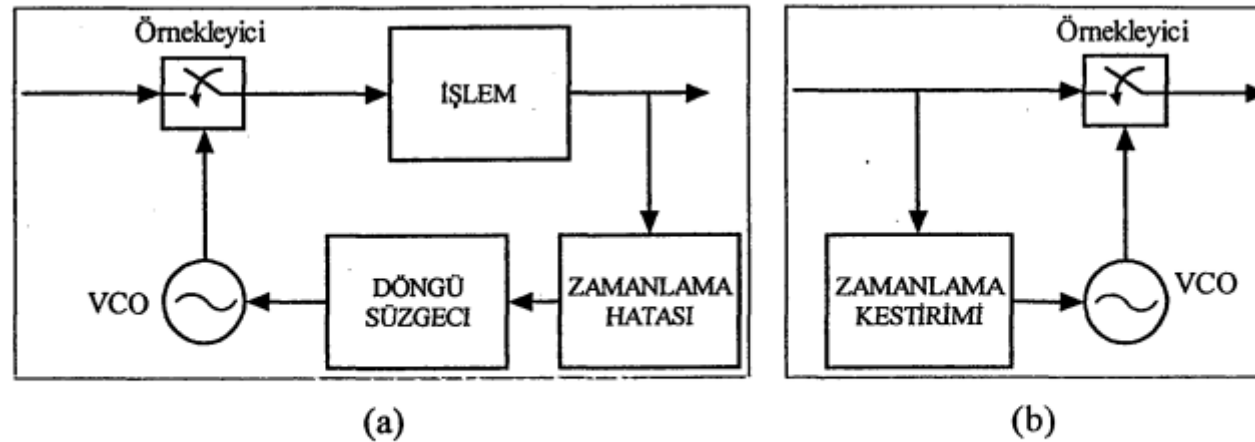
- Alıcıda Eşzamanlama yöntemleri genellikle üç grupta incelenir:
 - **Veri-destekli:** Verici tarafından gönderilen bilinen semboller (pilot, eğitim sembolleri vb.) kullanılır. Başarımı yüksektir, ancak bant genişliği harcar.
 - **Karar-yönelimli:** Alıcıda elde edilen karar sembollerine dayanır.
 - **Veri-desteksiz:** Bilinen veya karar sembollerine ihtiyaç duymaz.
- Eşzamanlama sistemleri iki çalışma kipine sahiptir:
 - **Yakalama:** Sistem başlangıçta zamanlamayı yakalar ve kararlı hâle gelir.
 - **İzleme:** Parametrelerdeki küçük değişimlere uyum sağlar.

SAYISAL HABERLEŞME

5.6. Alıcıda zamanlama Bilgisinin Elde Edilmesi

➤ Ayrıca, iki farklı eşzamanlama düzeni vardır:

- **İleri-beslemeli sistemler:** Blok bazlı çalışır; her blok için ayrı zamanlama kestirimi yapılır.
- **Geri-beslemeli sistemler:** Sürekli çalışır; her sembol için hata kestirimi ile osilatör ayarlanır.



Şekil 5.24. Eşzamanlama yöntemlerinin (a) geri-beslemeli (b) ileri-beslemeli çalışma düzenleri.

SAYISAL HABERLEŞME

5.7. Kanal İletim Kapasitesi

- Toplanır beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) etkisindeki bir haberleşme kanalının iletim kapasitesi, alınan işaretin *ortalama gücü*, *ortalama gürültü gücü* ve *kanal bant genişliğine* bağlı olarak bulunabilmektedir.
- Alınan işaretin *ortalama gücü* S , *ortalama gürültü gücü* N ve *kanal bant genişliği* B ile gösterildiğinde, kanalın iletim kapasitesi şu şekilde ifade edilir.

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

- Bu ilişki *Shannon-Hartley teoremi* olarak bilinmektedir.
- Kanal bant genişliği B , Hertz cinsinden kullanıldığında iletim kapasitesi C , bit/s cinsinden elde edilmektedir.
- $N_0/2$ güç spektral yoğunluğuna sahip beyaz Gauss gürültüsü kabul edildiğinde, alıcıdaki ortalama gürültü gücü iletim bant genişliğine bağlı olarak $N = N_0 B$ şeklinde yazılabilmekte.
- Bu durumda kanal kapasitesi şu şekilde ifade edilir.

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right)$$

SAYISAL HABERLEŞME

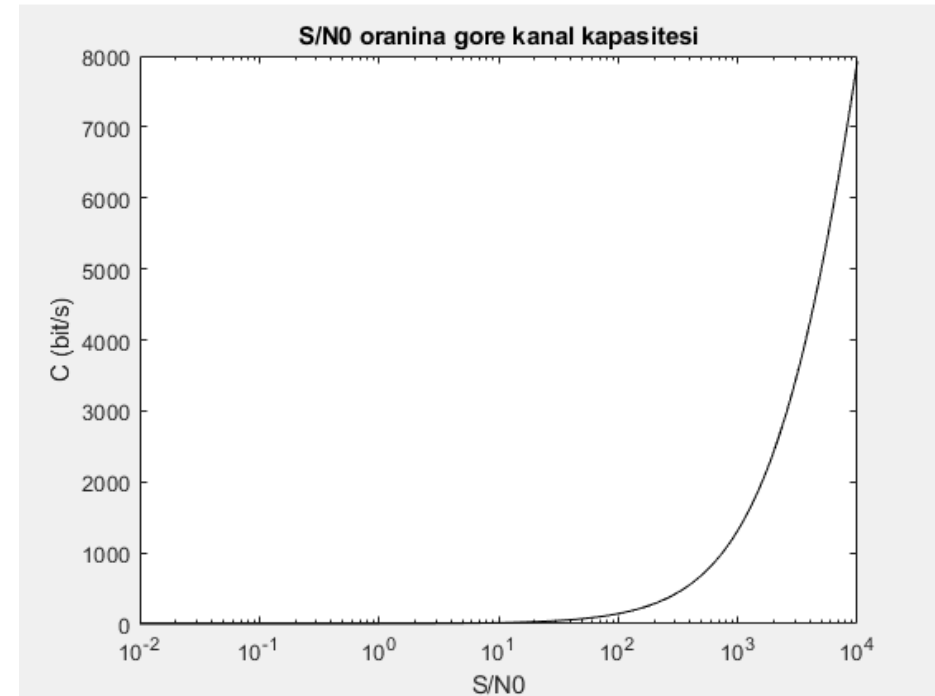
Örnek 5.7

- Matlab kullanarak AWGN etkisindeki bir kanalın,
- $B = 5000$ Hz bant genişliği ve -20 dB ile 40 dB arasında değişen S/N_0 , oranlarına bağlı olarak kanal kapasitesini çizdiriniz.
 - $S/N_0 = 30$ dB için bant genişliğine bağlı olarak kanal kapasitesini çizdiriniz.

Matlab Çözümü:

- a) Sabit bant genişliği ve değişen S/N_0 oranlarına bağlı olarak elde edilen kanal kapasitesi şekilde gösterilmektedir.

```
1 - clear all;
2 - close all;
3 - SN0_db=-20:0.1:40;
4 - % S/NO aralığı dB cinsinden
5 - B=5000; % bant genişliği
6 - SN0=10.^(SN0_db/10);
7 - % S/NO aralığı doğrusal ölçekte
8 - C=B.*log2(1+SN0./B);
9 - % kanal kapasitesi
10 - semilogx(SN0,C,'k');
11 - % kanal kapasitesini çiz
12 - title('S/NO oranına gore kanal kapasitesi');
13 - xlabel('S/NO'); ylabel('C (bit/s)')
```



SAYISAL HABERLEŞME

Örnek 5.7

- Matlab kullanarak AWGN etkisindeki bir kanalın,
 - a) $B = 5000$ Hz bant genişliği ve -20 dB ile 40 dB arasında değişen S/N_0 , oranlarına bağlı olarak kanal kapasitesini çizdiriniz.
 - b) $S/N_0 = 30$ dB için bant genişliğine bağlı olarak kanal kapasitesini çizdiriniz.

Matlab Çözümü:

- b) S/N_0 oranlarına bağlı olarak elde edilen kanal kapasitesi Şekil 5.30'da gösterilmektedir.

```

1 - clear all;
2 - close all;
3 - SNO_db=30; % S/N0 dB cinsinden
4 - SNO=10.^(SNO_db/10); % S/N0 doğrusal ölçekte
5 - B=[0:10,0:10:1000,1000:1000:1000000]; % bant genişliği doğrusal ölçekte
6 - C=B.*log2(1+SNO./B); % kanal kapasitesi
7 - semilogx(B,C,'k'); % kanal kapasitesini çiz
8 - title('bant genisligine gore kanal kapasitesi');
9 - xlabel('B (Hz) '); ylabel('C (bit/s)')

```

