

Dr. Sadık YILDIZ

sadikyildiz06@gmail.com

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

2025– ANKARA

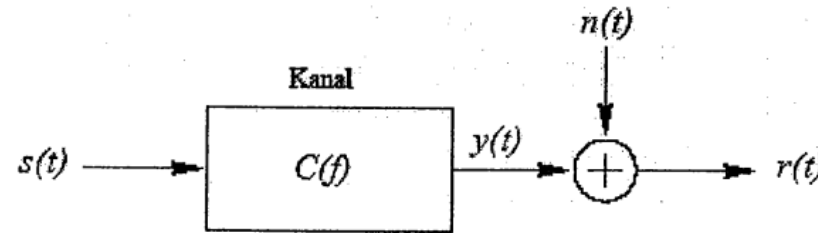
SAYISAL HABERLEŞME

5. Bantsınırlı Kanallardan Sayısal İletim

- Bu bölümde bantsınırlı kanallardan sayısal iletim sırasında meydana gelen sorunlar ele alınmakta ve bu sorunların üstesinden gelebilmek için uygulanabilecek yaklaşımlar üzerinde durulmaktadır.
- Özellikle *iletim bant genişliğinin* sınırlı olmasından dolayı işaret şeklinde meydana gelen bozulmalar incelenerek, göz diyagramı tanıtılmakta ve göz diyagramının sağladığı bilgiler gösterilmektedir.
- Ayrıca, sayısal haberleşme sistemlerinde önemli bir işlev gören *denkleştiriciler* tanıtılmaktadır.
- Sayısal haberleşme sistemlerinde mutlaka kurulması gereken eşzamanlamanın sağlanabilmesi için kullanılan yaklaşımlar ele alınmakta ve bir haberleşme kanalının iletim kapasitesi tanımlanmaktadır.

5.1. Bantsınırlı Kanalların Özellikleri

- Bir haberleşme kanalı Şekil 5.1'deki gösterildiği biçimde modellenenbilmektedir.
 - Verici tarafından iletilen işaret $s(t)$,
 - Kanalın frekans yanıtı $C(f)$,
 - Haberleşme kanalının iletilen işarete etkisi sonrasında elde edilen işaret $y(t)$,
 - Haberleşme ortamındaki toplanır gürültü $n(t)$,
 - Alıcıda alınan işaret ise $r(t)$ ile gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Haberleşme kanalının modellenmesi.

SAYISAL HABERLEŞME

5.1. Bantsınırlı Kanalların Özellikleri

- Telefon kanalları ve bazı radyo kanalları dahil birçok haberleşme kanalı *bantsınırlı doğrusal filtre* yapısında kabul edilebilmektedir.
- Haberleşme kanalının frekans yanıtı şu şekilde ifade edilir;

$$C(f) = A(f)e^{j\theta(f)}$$

- $A(f)$: Genlik yanıtı
 - $\theta(f)$: Faz yanıtı
- Faz yanıtı yerine tanımlanmış grup gecikmesi de kullanılmaktadır.

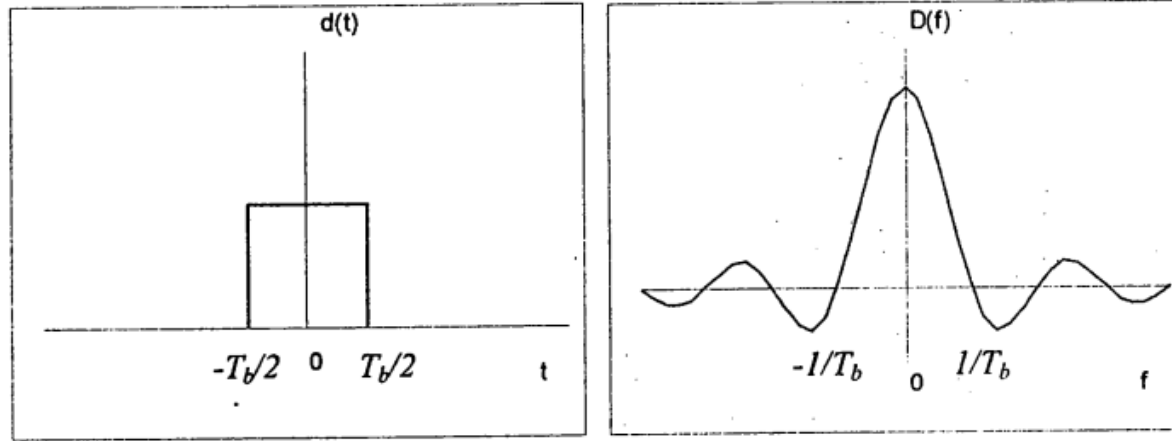
$$\tau(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(f)}{df}$$

SAYISAL HABERLEŞME

5.2. Simgelerarası Karışma

- Sayısal iletimde bir bitlik zaman dilimini kapsayan (T , genişliğinde) dikdörtgensel darbeler kullanıldığı takdirde darbenin frekans spektrumu Şekil 5.2'de gösterildiği gibi şu şekilde oluşmaktadır.

$$D(f) = T_b \operatorname{sinc}(fT_b)$$

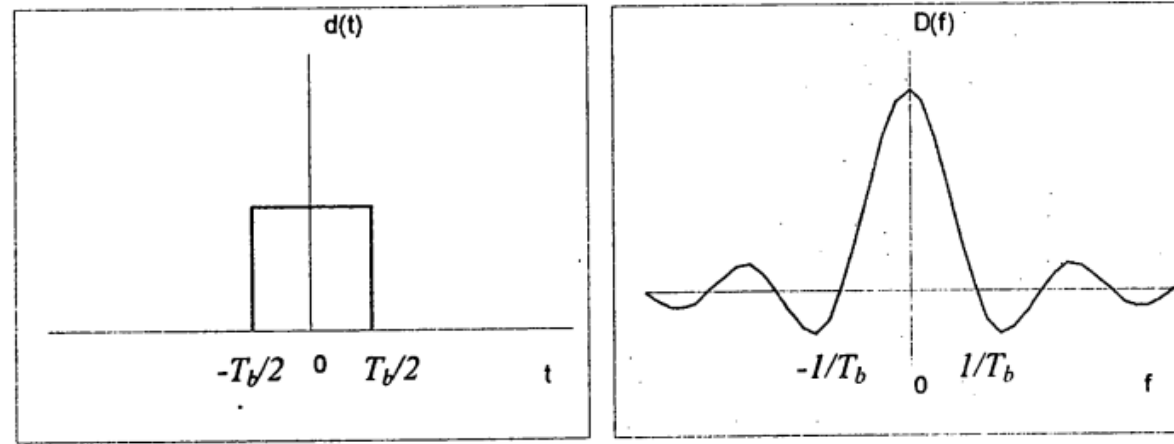


Şekil 5.2. Dikdörtgensel darbe işareti ve darbenin frekans spektrumu.

SAYISAL HABERLEŞME

5.2. Simgelerarası Karışma

- Dikdörtgensel darbenin $\text{sinc}(\cdot)$ şeklinde oluşan frekans spektrumu *eksi-sonsuzdan artı-sonsuz*a kadar devam etmektedir.
- Bu nedenle iletim esnasında ***darbe şeklinde bir bozulma olmaması*** için ***sonsuz bant genişliğine*** sahip bir ***haberleşme kanalının*** kullanılması gerekmektedir.
- Fakat, ***sonsuz bant genişliğine sahip haberleşme kanalları bulunmamaktadır.***
- Ayrıca ***frekans spektrumu*** son derece ***kısıtlı bir haberleşme kaynağı*** olduğundan, ***iletim için yüksek bir bant genişliğinin kullanılması verimsizliğe neden olmaktadır.***



Şekil 5.2. Dikdörtgensel darbe işareti ve darbenin frekans spektrumu.

SAYISAL HABERLEŞME

5.2. Simgelerarası Karışma

- Göndericide iletim için dikdörtgensel darbeler kullanıldığında, haberleşme kanalının sınırlı bant genişliği nedeniyle iletilen frekans bileşenlerinin bir kısmı alıcıya ulaşamayacağından alıcıda elde edilen darbe şekillerinde bozulmalar meydana gelmektedir.
- Şekil 5.1'de gösterilen haberleşme kanalı modelinde, $y(t)$ işaretinin **frekans spektrumunun** $Y(f) = S(f) C(f)$ şeklinde oluştuğu görülmektedir.
- Bu nedenle **sınırlı bir bant genişliğine** sahip **bir haberleşme kanalı** üzerinden iletim yapıldığında, **haberleşme kanalı iletilen işaretin frekans spektrumunu sınırlandırmaktadır**.
- İşaretin frekans spektrumunun sınırlandırılması sonucunda, **zaman uzayında darbe şeklinde yayılma** meydana gelmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

5.2. Simgelerarası Karışma

- Darbe şeklinin *zaman uzayında* yayılması neticesinde **darbe**, kendisine ayrılan *bit zaman diliminin dışına* ve dolayısıyla *komşu darbelerin zaman dilimlerinin* içerisine taşmaktadır.
- Darbelerin kendi zaman dilimlerini aşarak komşu darbelerin zaman dilimine taşması, **simgelerarası karışma (ISI)** olarak adlandırılmaktadır.
- İletilen darbe işaretleri kendi zaman dilimlerinden komşu zaman dilimlerine taşıdığı taktirde, komşu zaman dilimlerindeki sembollerin doğru olarak algılanma olasılığı azalmakta ve bunun sonucunda iletim performansı düşmektedir.
- **Haberleşme kanalı bant genişliği yeteri kadar büyük tutulursa**, yani **sembol oranından ($f = 1/T$)** birkaç kat büyük bir bant genişliği kullanılırsa, **darbenin sinc(.) şeklinde spektrumunun büyük kısmı iletilebilmektedir.**
- Bu durumda, **sinc() spektrumunun göreceli olarak hızlı sönümleniyor olmasından dolayı simgelerarası karışma sonucunda oluşacak bozulmalar ihmal edilebilecek kadar küçük olmaktadır.**
- Fakat, iletilen darbelerin enerjilerinin büyük bölümü $f = 1/T$, frekansına kadar olan spektrum kısmında yer aldığından, bu frekans aralığından **çok daha büyük bir bant genişliğinin ayrılması haberleşme kaynaklarının verimsiz kullanılmasına neden olduğundan bu yaklaşım tercih edilmemektedir.**

SAYISAL HABERLEŞME

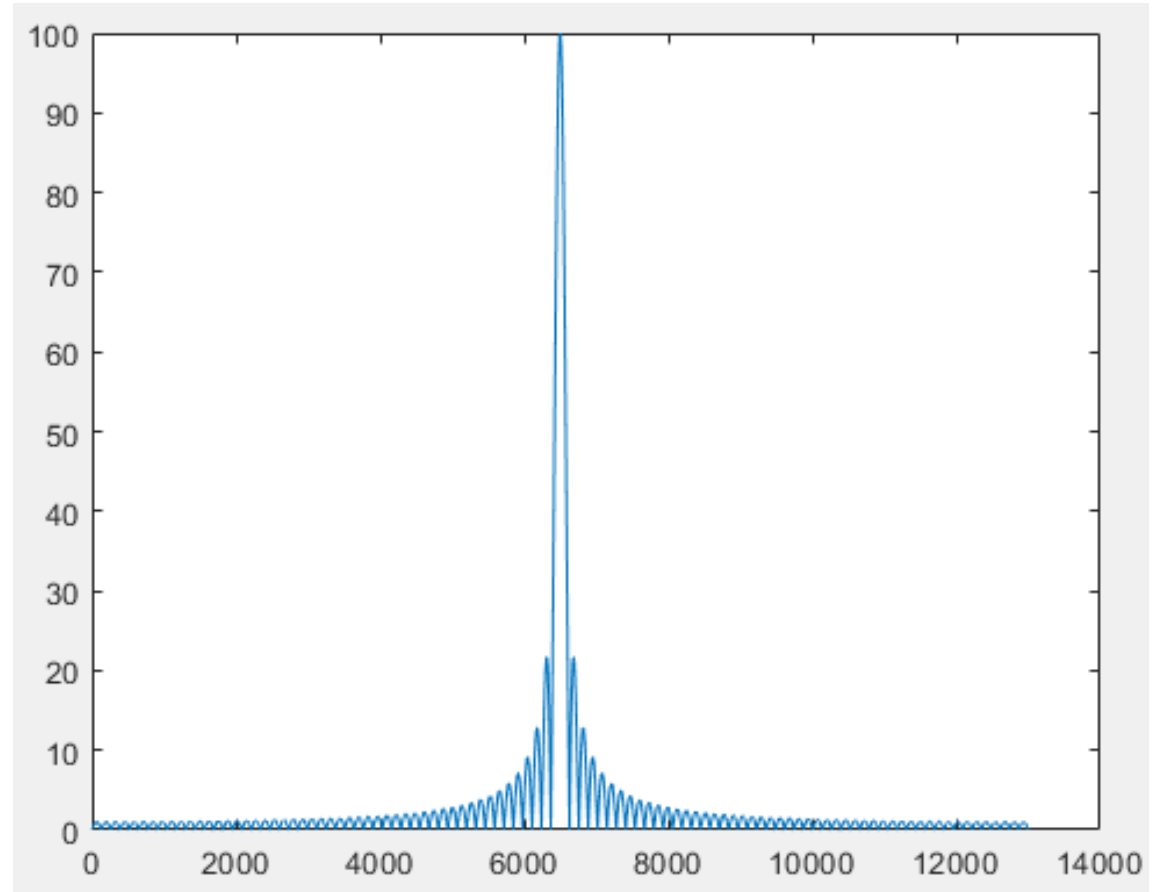
5.2. Simgelerarası Karışma

- **Örnek 5.1.** Matlab kullanarak haberleşme kanalının sınırlı bant genişliğinin ve doğrusal olmayan faz yanıtının dikdörtgensel bir darbe iletimine etkisini inceleyiniz.

```

1 - Fs=10000;
2 - % Tabanbant modüle edilmiş işaretin örnekleme frekansı
3 - Fd=100;
4 - % İkili işaretin örnekleme frekansı (modülasyon öncesi).
5 - b=[0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0] % İkili bit dizini
6 - bnrz=tekkutuplu(b,Fd,Fs, 'nrz'); % Tek-kutuplu NRZ işaretini elde et
7 - stairs(bnrz,'k'); % İkili bilgi dizinin çizdir
8 - fx=fft(bnrz, 13000); % frekans spektrumunu hesapla
9 - plot(abs(fftshift(fx))); % genlik yanıtını çizdir
10
11 %% tekkutuplu Fonksiyon
12 function y= tekkutuplu(isaret, fd, fs, kodlama)
13     oran=fs/fd; % ikili bite ait her örneğin kaç örneğe modüle edileceği oranı
14     if strcmp(kodlama, 'nrz') % NRZ kodlama isteniyor
15         for i=0:max(size(isaret))-1
16             if isaret(i+1)==0 % ikili değer sıfır ise
17                 y(i*oran+1:(i+1)*oran)=zeros(1,oran); % ikili değer bir ise
18             else
19                 y(i*oran+1:(i+1)*oran)=ones(1,oran);
20             end
21         end
22     elseif strcmp(kodlama, 'rz') % RZ kodlama isteniyor
23         for i=0:max(size(isaret))-1
24             if isaret(i+1)==0 % ikili değer sıfır ise
25                 y(i*oran+1:(i+1)*oran)=zeros(1,oran);
26             else % ikili değer bir ise
27                 y(i*oran+1:ceil((i+0.5)*oran))=ones(1,ceil(oran*0.5));
28                 y(ceil((i+0.5)*oran+1):(i+1)*oran)=zeros(1,oran-round(oran*0.5));
29             end
30         end
31     else
32         error('Hatalı hat kodu');
33     end
34 end

```



SAYISAL HABERLEŞME

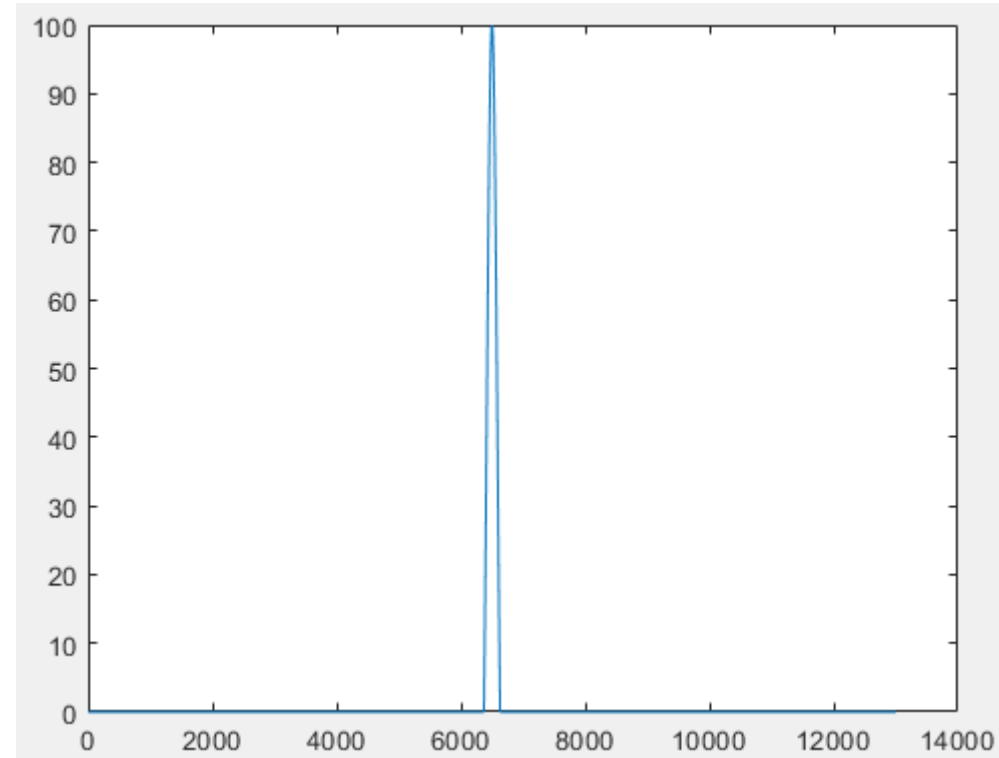
5.2. Simgelerarası Karışma

➤ Örnek 5.1.

```

1  Fs=10000;
2  % Tabanbant modüle edilmiş işaretin örnekleme frekansı
3  Fd=100;
4  % İkili işaretin örnekleme frekansı (modülasyon öncesi).
5  b=[0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0]; % İkili bit dizini
6  bnrz=tekkutuplu(b,Fd,Fs, 'nrz'); % Tek-kutuplu NRZ işaretini elde et
7  stairs(bnrz,'k'); % İkili bilgi dizinin çizdir
8  fx=fft(bnrz, 13000); % frekans spektrumunu hesapla
9  plot(abs(fftshift(fx))); % genlik yanıtını çizdir
10
11 fr=fx; % alınan spektrumu iletilen spektruma eşitle
12 fr(130:13000 - 130) = 0 % kanalın bant sınırını almanın spektruma yansıt
13 plot(abs(fftshift(fr))); % alınan spektrumu çizdir
14 %% tekkutuplu Fonksiyon
15 function y= tekkutuplu(isaret, fd, fs, kodlama)
16     oran=fs/fd; % İkili bite ait her örneğin kaç örneğe modüle edileceği oranı
17     if strcmp(kodlama, 'nrz') % NRZ kodlama isteniyor
18         for i=0:max(size(isaret))-1
19             if isaret(i+1)==0 % İkili değer sıfır ise
20                 y(i*oran+1:(i+1)*oran)=zeros(1,oran); % İkili değer bir ise
21             else
22                 y(i*oran+1:(i+1)*oran)=ones(1,oran);
23             end
24         end
25     elseif strcmp(kodlama, 'rz') % RZ kodlama isteniyor
26         for i=0:max(size(isaret))-1
27             if isaret(i+1)==0 % İkili değer sıfır ise
28                 y(i*oran+1:(i+1)*oran)=zeros(1,oran);
29             else % İkili değer bir ise
30                 y(i*oran+1:ceil((i+0.5)*oran))=ones(1,ceil(orán*0.5));
31                 y(ceil((i+0.5)*oran+1):(i+1)*oran)=zeros(1,oran-round(orán*0.5));
32             end
33         end
34     else
35         error('Hatalı hat kodu');
36     end
37 end

```



SAYISAL HABERLEŞME

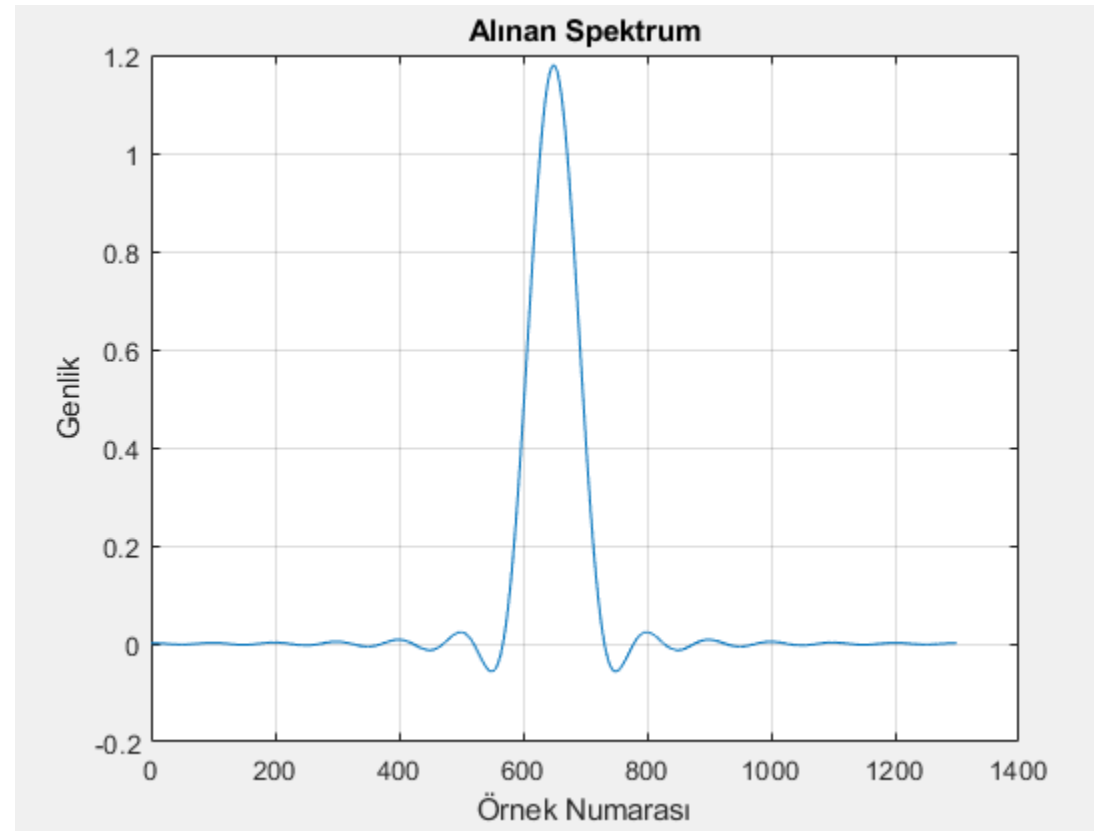
5.2. Simgelerarası Karışma

➤ Örnek 5.1.

```

1 - Fs=10000; % Tabanbant modüle edilmiş işaretin örnekleme frekansı
2 - Fd=100; % İkili işaretin örnekleme frekansı (modülasyon öncesi).
3 - b=[0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0]; % İkili bit dizini
4 - bnrz=tekkutuplu(b,Fd,Fs, 'nrz'); % Tek-kutuplu NRZ işaretini elde et
5 - stairs(bnrz,'k'); % ikili bilgi dizinin çizdir
6 - fx=fft(bnrz, 13000); % frekans spektrumunu hesapla
7 - plot(abs(fftshift(fx))); % genlik yanıtını çizdir
8
9 - fr=fx; % alınan spektrumu iletilen spektruma eşitle
10 - fr(130:13000 - 130) = 0 % kanalın bant sınırılı olmasını alınan spektruma yansıt
11 - a=real(ifft(fr,13000));
12 - plot(0:1299, a(1:1300)); % X eksenini 0 ile 1300 arasına ayarlar
13 - xlabel('Örnek Numarası');
14 - ylabel('Genlik');
15 - title('Alınan Spektrum');
16 - grid on;
17
18 %% tekkutuplu Fonksiyon
19 function y= tekkutuplu(isaret, fd, fs, kodlama)
20     oran=fs/fd; % ikili bite ait her örneğin kaç örneğe modüle edileceği oranı
21     if strcmp(kodlama, 'nrz') % NRZ kodlama isteniyor
22         for i=0:max(size(isaret))-1
23             if isaret(i+1)==0 % ikili değer sıfır ise
24                 y(i*oran+1:(i+1)*oran)=zeros(1,oran); % ikili değer bir ise
25             else
26                 y(i*oran+1:(i+1)*oran)=ones(1,oran);
27             end
28         end
29     elseif strcmp(kodlama, 'rz') % RZ kodlama isteniyor
30         for i=0:max(size(isaret))-1
31             if isaret(i+1)==0 % ikili değer sıfır ise
32                 y(i*oran+1:(i+1)*oran)=zeros(1,oran);
33             else % ikili değer bir ise
34                 y(i*oran+1:ceil((i+0.5)*oran))=ones(1,ceil(orán*0.5));
35                 y(ceil((i+0.5)*oran+1):(i+1)*oran)=zeros(1,oran-round(orán*0.5));
36             end
37         end
38     else
39         error('Hatalı hat kodu');
40     end

```



SAYISAL HABERLEŞME

5.2. Simgelerarası Karışma

➤ Örnek 5.1.

```

1 - Fs = 10000; % Örneklem frekansı
2 - Fd = 100; % İkili işaretin örneklem frekansı
3 - b = [0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0]; % İkili bit dizisi
4 - bnrz = tekkutuplu(b, Fd, Fs, 'nrz'); % Tek-kutuplu NRZ işareti elde et
5
6 - fx = fft(bnrz, 13000); % Frekans spektrumunu hesapla
7
8 - f = -6500:6499; % Frekans aralığını oluştur
9
10 - k1 = exp(-1i*2*pi*f/100); % Doğrusal fazlı kanalın frekans yanıtı
11 - k1 = fftshift(k1); % Kanalın frekans yanıtını düzenle
12
13 - frl = fx .* k1; % Doğrusal fazlı kanalın işarete etkisi
14 - al = real(ifft(frl, 13000)); % İşaretin zaman uzayında geri oluşturulması
15 - al = al(1:length(bnrz)); % Alınan işaretin bilgi kısmını kes
16
17 - figure;
18 - plot(al); % Doğrusal fazlı kanaldan alınan işareti çizdir
19 - title('Doğrusal Fazlı Kanal');
20 - xlabel('Örnek Numarası');
21 - ylabel('Genlik');
22 - grid on;
23
24 - pause; % Kullanıcıdan giriş beklemesi için
25
26 - k2 = exp(-1i*2*pi*f.^1.2/100); % Doğrusal fazlı olmayan kanalın frekans yanıtı
27 - k2 = fftshift(k2); % Kanalın frekans yanıtını düzenle
28
29 - r2 = fx .* k2; % Doğrusal fazlı olmayan kanalın işarete etkisi
30 - a2 = real(ifft(r2, 13000)); % İşaretin zaman uzayında geri oluşturulması
31 - a2 = a2(1:length(bnrz)); % Alınan işaretin bilgi kısmını kes
32
33 - figure;
34 - plot(a2); % Doğrusal fazlı olmayan kanaldan alınan işareti çizdir
35 - title('Doğrusal Fazlı Olmayan Kanal');
36 - xlabel('Örnek Numarası');
37 - ylabel('Genlik');

```

```

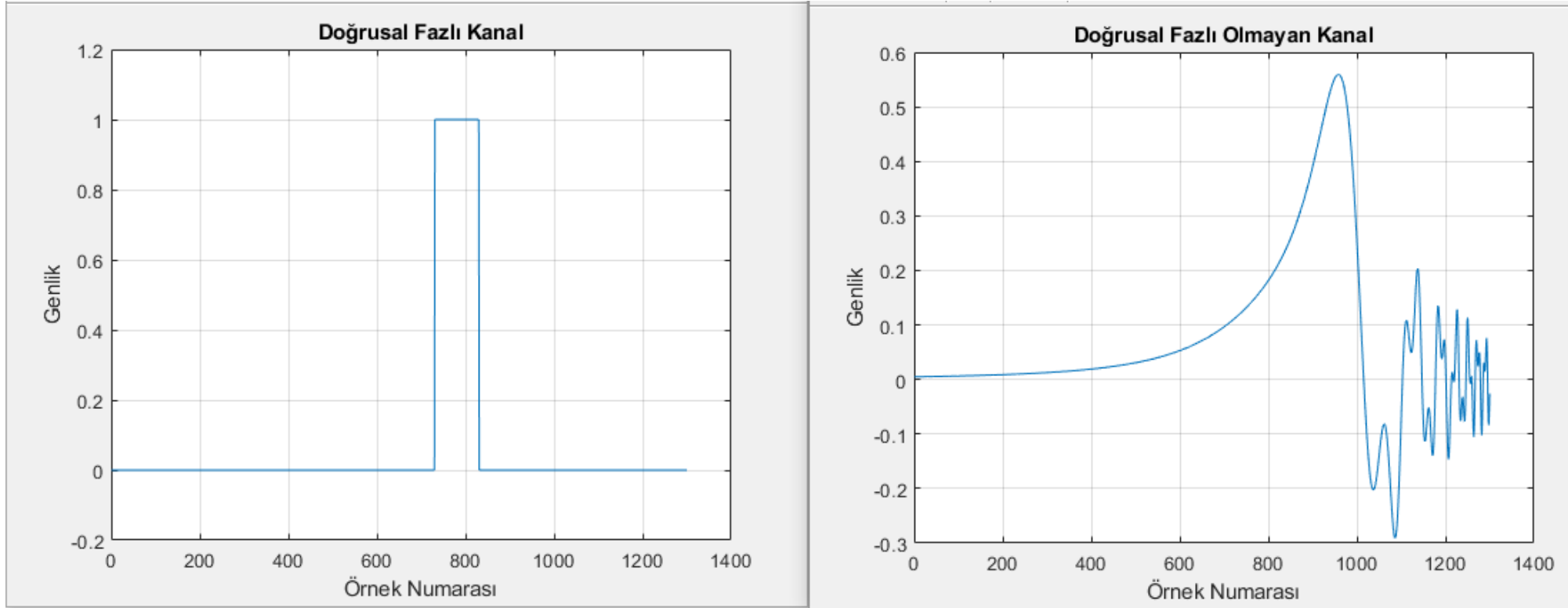
%% tekkutuplu Fonksiyon
function y= tekkutuplu(isaret, fd, fs, kodlama)
    oran=fs/fd; % ikili bite ait her örneğin kaç örneğe modüle edileceği oranı
    if strcmp(kodlama, 'nrz') % NRZ kodlama isteniyor
        for i=0:max(size(isaret))-1
            if isaret(i+1)==0 % ikili değer sıfır ise
                y(i*oran+1:(i+1)*oran)=zeros(1,oran); % ikili değer bir ise
            else
                y(i*oran+1:(i+1)*oran)=ones(1,oran);
            end
        end
    elseif strcmp(kodlama, 'rz') % RZ kodlama isteniyor
        for i=0:max(size(isaret))-1
            if isaret(i+1)==0 % ikili değer sıfır ise
                y(i*oran+1:(i+1)*oran)=zeros(1,oran);
            else % ikili değer bir ise
                y(i*oran+1:ceil((i+0.5)*oran))=ones(1,ceil(orán*0.5));
                y(ceil((i+0.5)*oran+1):(i+1)*oran)=zeros(1,oran-round(orán*0.5));
            end
        end
    else
        error('Hatalı hat kodu');
    end
end

```

SAYISAL HABERLEŞME

5.2. Simgelerarası Karışma

➤ Örnek 5.1.



SAYISAL HABERLEŞME

5.2. Simgelerarası Karışma

- **Örnek 5.1.**
- İletim için dikdörtgensel darbe biçimleri kullanıldığında, haberleşme kanalının bantsınırlı olmasından dolayı işaretin frekans spektrumunda meydana gelen sınırlama sonucunda darbeler komşu zaman dilimlerine taşmakta ve **simgelerarası karışma (ISI)** meydana gelmektedir.
- Simgelerarası karışma, özellikle dar bantlı haberleşme sistemlerinde, önemli performans kayıplarına yol açabilmektedir.
- Simgelerarası karışma etkisinin azaltılabilmesi için, tipik olarak vericide, bir çeşit özel alçak geçiren filtre kullanılarak, iletilen darbe biçiminin frekans bandı sınırlandırılabilir.
- Bu işlem darbenin dikdörtgensel biçimini değiştirdiğinden darbe biçimlendirme olarak adlandırılmaktadır.
- Vericide bu amaçla kullanılan filtre de genelde iletim filtresi veya darbe biçimlendirme filtresi olarak adlandırılmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

5.2. Simgelerarası Karışma

- **Örnek 5.1.**
- Darbe biçimlendirmenin önemli bir özelliği, *iletlen darbenin frekans bandı sınırlandırıldığından*, *iletlen işaretin bant genişliğinin düşürülebilmesi* ve bu sayede *daha verimli spektrum* kullanımının sağlanabilmesidir.
- Darbe biçimlendirme, iletilen işaretin frekans spektrumunu sınırlandırarak bant-sınırlı kanallar üzerinden iletim yapıldığında sistem performansını arttırmaktadır.
- Fakat, *darbe biçimlendirme* ile *haberleşme kanalının diğer fiziksel özelliklerinden* dolayı oluşan *genlik veya faz bozunumlarının* önlenmesi mümkün olmamaktadır.
- Haberleşme kanalının yol açtığı genlik veya faz bozunumlarının önlenmesi için alıcıda **denkleştiriciler** kullanılabilmektedir.
- **Denkleştiriciler**, haberleşme kanalının etkisini dengelemeye çalışarak kanalın neden olduğu bozunumların düzeltilmesini amaçlamaktadır.
- Özellikle gelişmiş haberleşme sistemlerinde, çalışma biçimini haberleşme kanalının değişen yapısına göre ayarlayabilen *uyarlanır filtre* yapısındaki **denkleştiriciler** kullanılmaktadır.