

DENEY 6: SAYISAL MODÜLASYON

AMAÇ: Temel sayısal modülasyon tekniklerinin MATLAB ortamında incelenmesi.

ÖN HAZIRLIK

Deneyde kullanılacak `quantiz`, `de2bi`, `stairs`, `reshape`, `bi2de` hazır fonksiyonlarını inceleyiniz, kullanımlarını öğreniniz.

İnsanların algıladığı bilgi (ses, görüntü vb.) analog biçimdedir. Sayısal haberleşme için yapılması gereken ilk iş bilginin sayısal darbelerle çevrilmesidir. Vericiden gönderilen bu darbeler alıcı kısımda tekrar analog bilgi haline getirilir. Analog bilgiyi sayısal iletim ortamına hazırlamak için değişik modülasyon yöntemleri vardır. Yaygın olarak kullanılan sayısal haberleşme sistemlerindeki modülasyon türleri aşağıda verilmiştir.

- PAM (Darbe Genlik Modülasyonu)
- PCM (Darbe Kod Modülasyonu)
- PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu)
- PPM (Darbe Durum Modülasyonu)
- ASK (Genlik Kaydırmalı Anahtarlama)
- FSK (Frekans Kaydırmalı Anahtarlama)
- PSK (Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
- Delta Modülasyonu
- QPSK (Dördül Faz Kaydırmalı Anahtarlama)

Sayısal haberleşme sistemlerinin analog haberleşme sistemlerine göre üstünlükleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- **Darbe modülasyonunda iletilen güç yalnız kısa darbeler içine yoğunlaşmıştır. Analog modülasyonundaki gibi sürekli değildir.**
- **Darbeler arasındaki boşluklar başka bir mesaj sinyalinin darbeleri ile doldurulabilir. Böylece tek bir haberleşme sistemi üzerinden birden fazla bilgi sinyali yollanabilir. (Çoğullama)**
- **Tümleşik devre teknolojisinde gelişim çok hızlı olduğundan sayısal haberleşme devrelerini gerçekleştirmek her gün daha kolay hale gelmektedir.**
- **Gürültü bağıışıklığı çok daha iyidir.**

Sayısal ortamda iletilen 0 ya da 1 bilgisine *bit* denir. Seri iletimde saniyede iletilen bit sayısına bps (*bit per second*) denir. Sembol ya da sinyal elemanına *baud* denir. Bir sinyal

elemanı birden fazla bitten oluşabilir. Veri iletiminde modülatör çıkışında bir saniyede meydana gelen sembol (sinyal) değişikliğine *baud hızı* denir. Baud hızı **baud/s** ile gösterilir. Baud hızı sinyalin anahtarlama hızını gösterir. Sayısal bilgi iletiminde bozulan ya da yanlış algılanan bit oranına BER (*Bit Error Rate*) denir.

$$BER = \frac{\text{Gönderilen hatalı bit sayısı}}{\text{Toplam gönderilen bit sayısı}}$$

Kanal, sinyalin iletimi sırasında bilgi sinyalinin oluşturduğu frekans bandıdır. Bir iletim ortamında 1 saniyede iletebilecek maksimum bit miktarına **kanal kapasitesi** denir. Bir ortamın kanal kapasitesi Shannon eşitliği ile ifade edilir:

$$C = B * \log_2 \left(1 + \frac{\text{Sinyal}}{\text{Gürültü}} \right)$$

Burada, C kanal kapasitesi (bps), B band genişliği (Hertz)'dir. Örneğin standart bir telefon hattında (B = 3 kHz), S/N oranı 40 dB ise kanal kapasitesi:

$$40 \text{ dB} = 10 \log (S/N)$$

$$S/N = 10000$$

$$C = B * \log_2 (1 + S/N)$$

$$C = 3 * 10^3 * \log_2 (1 + 10000)$$

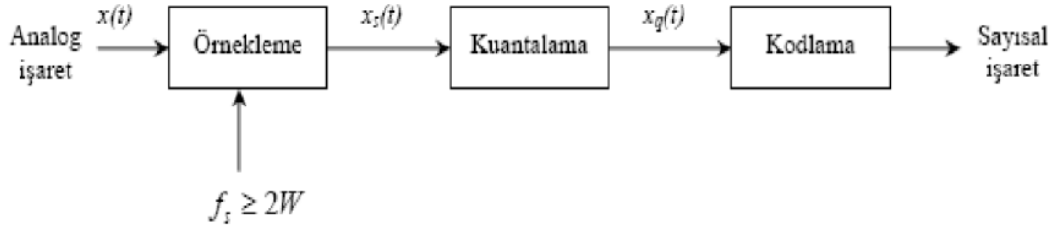
$$C = 39,863 \text{ bps olarak bulunur.}$$

6.1 DARBE KOD MODÜLASYONU (*Pulse Code Modulation - PCM*)

Darbe Kod Modülasyonu (DKM), analog işaretlerin belirlenmiş sayısal formda dönüştürülmesini sağlayan bir tekniktir. Sayısal işaretlerin, gürültüden etkilenmemesi ve tüm devre teknolojisinin gelişmesi ile sayısal verinin işlenmesinin (iletilme, sıkıştırma) nispeten daha ucuz olması bilgi iletimi, saklanması ve işlenmesi sırasında sayısal formatın analog formata göre tercih edilmesine sebep olmuştur. Bununla birlikte analog formdaki kaynak bilgisinin, sayısal forma dönüştürülmesi sırasında meydana gelen kuantalama ve kodlama hatalarından dolayı alıcıda elde edilen bilgideki bozulma bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle kaynak verisinin konuşma işaretleri olması alıcıdaki bozulmayı daha da belirgin hale getirmekte ve sayısal formun konuşma bilgisi için kullanılmasını engellemektedir. DKM yukarıda açıklanan probleme bir çözüm önerisi olarak 1970'li yıllarda ortaya çıkmış ve günümüzde bu amaç için en çok kullanılan sayısallaştırma tekniği olmuştur. DKM 3 aşamada gerçekleştirilir.

- Örnekleme
- Kuantalama
- Kodlama

Şekil 1'de DKM adımları verilmiştir.



Şekil 1. DKM’da verici bölümünün blok diyagramı.

6.1.1 ÖRNEKLEME

Tüm haberleşme sistemlerinde amaç en hızlı ve sağlıklı veri iletimini sağlamaktır. Analog haberleşmenin bilinen sakıncaları nedeniyle sayısal haberleşme tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bir analog işaretin sayısal işarete dönüştürülmesinde en önemli nokta, analog işaretin uygun bir örnekleme frekansı ile örneklenmesidir. Bunun için bilgi işareti, teoride ideal bir darbe dizisi ile pratikte ise darbe katarı ile çarpılır. Örnekleme işleminde alıcıda işaretin bozulmadan yeniden elde edilebilmesi için teorik olarak, f_{\max} bilgi işaretinin en yüksek frekans değeri olmak üzere örnekleme frekansı

$$f_{\text{örnekleme}} = 2 * f_{\max}$$

seçilmelidir. **Nyquist koşulu yeterli olduğu halde, pratikte örnekleme frekansı, alıcı tarafta bulunan alçak geçiren süzgecin ve diğer cihazların ideal olmaması nedeniyle $2*f_{\max}$ frekansından biraz daha büyük seçilir.**

6.1.2 KUANTALAMA

Bir işaretin kuantalanması ile işaretin alabileceği en küçük genlik ile en büyük genlik değeri arasının basamaklara ayrılması ve işaretin bu basamaklarla yaklaşığının elde edilmesi gerçekleştirilir. Bilgi işareti $x(t)$ ’nin genliğinin minimum ve maksimum değerleri sırasıyla V_{\min} ve V_{\max} olsun. Eğer n basamaklı ikili sayılar kullanılacaksa, kuantalama adım aralığı a :

$$a = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2^n}$$

Burada 2^n kuantal seviyesidir.

6.1.3 KODLAMA

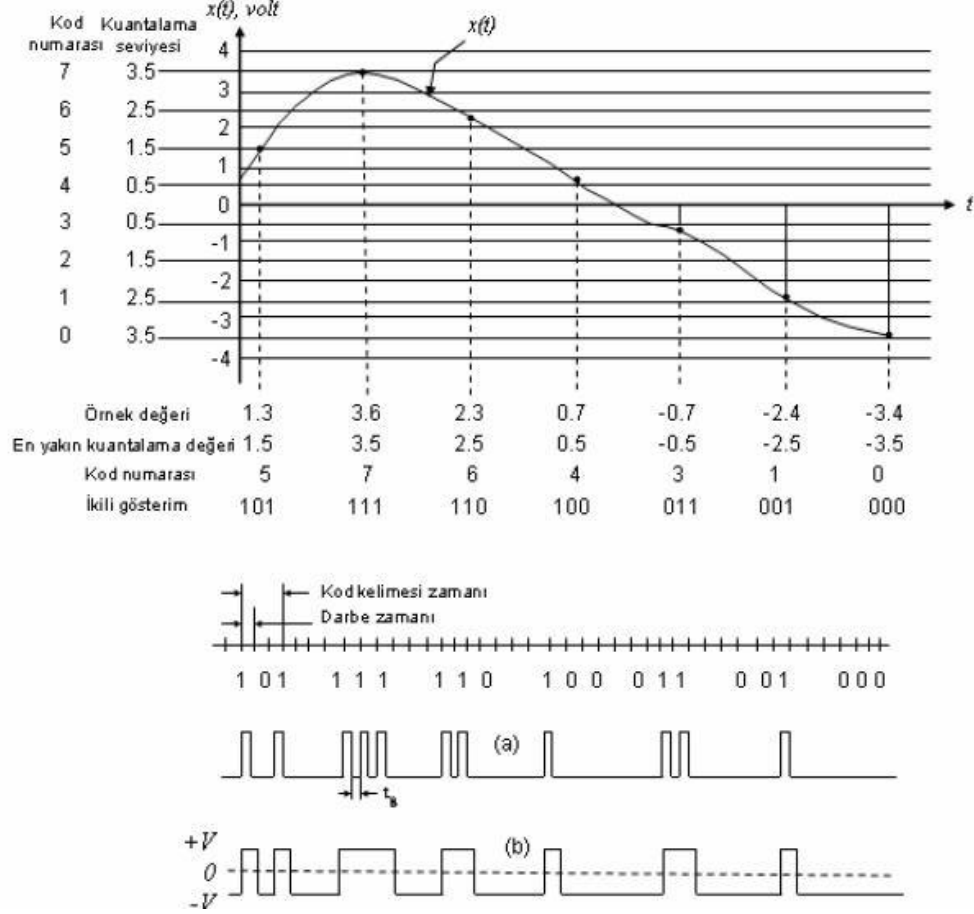
İletilecek sinyalin bitler ile anlamlandırılmasına kodlama denir. K sayıda karakter, bit olarak kodlanmak istendiğinde, gerekli bit sayısı

$$n = \log_2 K$$

ile hesaplanır. **Kodlama sonunda gerekli bit ve kullanılan bit arasındaki orana kod etkinliği (k_e) denir.**

$$k_e = \frac{\text{Gerekli bit sayısı}}{\text{Kullanılan bit sayısı}}$$

Şekil 2’de analog bir işaretin örneklenmesi, kuantalanması ve buna karşılık gelen DKM işaretinin elde edilmesi bir örnek üzerinde gösterilmiştir ($n = 3$, $a = 1$).



Şekil 2. Analog bir işaretin örneklenmesi ve buna karşı düşen DKM işaretinin gösterilmesi.

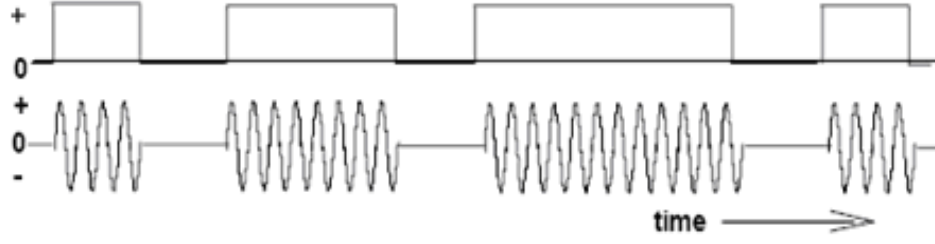
6.2 GENLİK KAYDIRMALI ANAHTARLAMA (*Amplitude-shift Keying - ASK*)

Bu Modülasyon tipinde, taşıyıcı işaretin genliği iki veya daha fazla değer arasında anahtarlanır. İkili durumda genellikle var-yok anahtarlama kullanılır. Tipik olarak var durumu "1" koduna, yok durumu ise "0" koduna karşı düşmektedir. ASK işareti Şekil 3’deki gibidir.

Modülasyon indisi: Bilgi sinyal genliğinin taşıyıcı sinyal genliğine oranına modülasyon indisi denir.

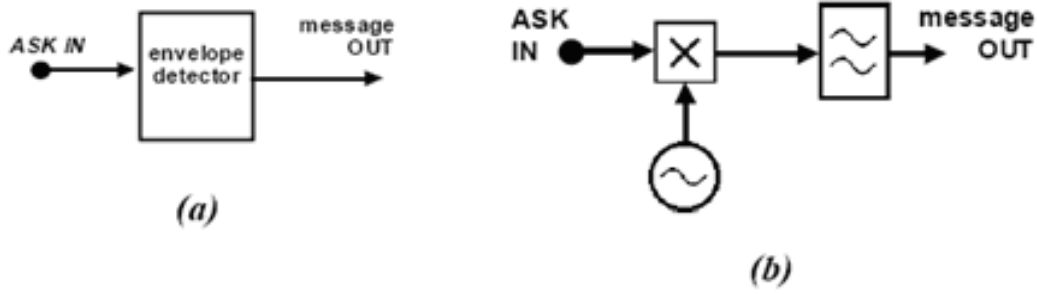
İkili "1" işareti için ASK dalga biçimi

$$\Phi(t) = \begin{cases} A \sin \omega_0 t & , 0 < t \leq T, 2T < t \leq 4T \\ \cdot & , T < t \leq 2T, 4T < t \leq \dots \end{cases}$$



Şekil 3. Mesaj (Bilgi) işareti ve ASK işareti

ASK demodülasyonunda orjinal işaretin elde edilmesi için uyumlu süzgeç yapısından yararlanılabilir. Bu dalgayı bir osilatör yardımıyla kolaylıkla elde etmek mümkündür. Bu deneyde ASK bir genlik modülasyonlu işaret olduğundan bir zarf detektörü veya product demodülatör ile demodülasyonu ele alınmıştır. Bu demodülasyon yapılarının blok diyagramları Şekil 4’de gösterilmiştir.

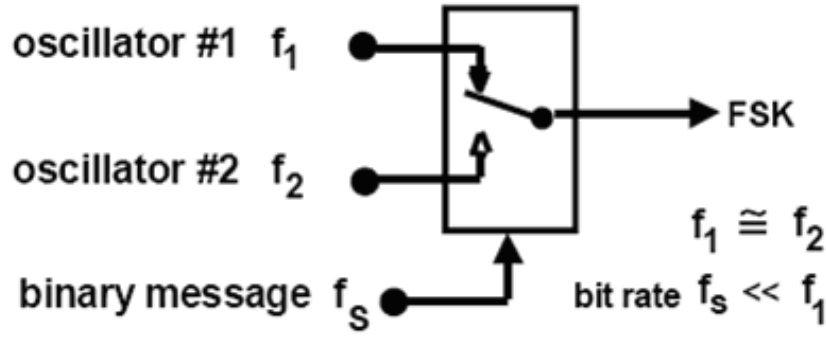


Şekil 4. ASK demodülasyon metodları

6.3 FREKANS KAYDIRMALI ANAHTARLAMA (Frequency-shift Keying - FSK)

Frekans kaydırmalı anahtarlama modülasyonu, iletilmesi amaçlanan sayısal mesaj işareti karşı düşen ayrık bir frekans değerine sahip bir dalga formunun üretilmesi esasına dayanmaktadır. Yüksek güçlü vericilerde sinyal/gürültü (SNR) oranının çok küçük olması istenir. Yüksek güçlü genlik modülasyonlu vericilerde SNR oranı problem yaratacak kadar büyük olur. Bu problemten kurtulmak için frekans modülasyonu geliştirilmiştir. Frekans modülasyonunda bilgi işaretinin genliğine göre taşıyıcı işaretin frekansı değişir. Temel bant işaretin sadece iki değerden birini aldığı varsayıldığından, modülasyon işlemi bir anahtarlama operasyonu olarak düşünülebilir. FSK’da taşıyıcı işaretin ani frekansı, sayısal işarete bağlı olarak iki veya daha çok değer arasında anahtarlanır. FSK işaretin üretimine ilişkin blok diyagram Şekil 5’de verilmiştir.

$$\Phi_1(t) = \begin{cases} A \sin \omega_1 t & , 0 < t \leq T, 2T < t \leq 4T \\ A \sin \omega_2 t & , T < t \leq 2T, 4T < t \leq \dots \end{cases}$$



Şekil 5. FSK üretimi

$$s_i(t) = g(t) \cos(2\pi f_i t)$$

Burada $g(t)$ darbe şekillendirme fonksiyonu ve $f_i = f_c + \Delta f(i-1)$, $i=1,2, \dots, M=2^k$ her bir dalga formunun frekansını göstermektedir. Burada faz uyumlu demodülasyon durumunda $\Delta f = 1/2T_s$ değerini alırken, faz uyumsuz demodülasyon durumunda ise $\Delta f = 1/T_s$ değerini almaktadır.

- Üstünlükleri;
 - Sinyal üzerine binen gürültü seviyesi kesilebildiği için ses kalitesi yüksektir.
 - Frekans modülasyonunun gürültü bağışıklığı genlik modülasyonundan daha iyidir.
 - FM'in yakalama etkisi vardır. Bu etkiden dolayı istenmeyen sinyalleri kolaylıkla yok edebilir. Aynı frekanstaki iki sinyalden hangisinin çıkış gücü fazla ise o sinyalin alıcı tarafından alınmasına *yakalama etkisi (Capture)* denir.
- Sakıncaları;
 - FM çok büyük bant genişliği kullanır.
 - FM devreleri daha pahalıdır.

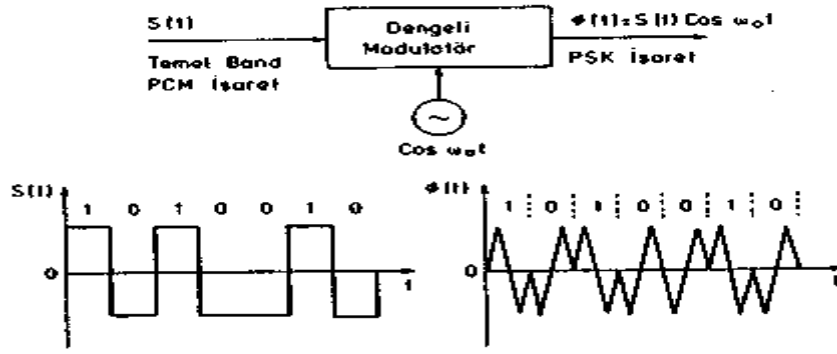
6.4 FAZ KAYDIRMALI ANAHTARLAMA (Phase-shift Keying - PSK)

İkili işaretler için faz kaydırmalı anahtarlama (Phase Shift Keying-PSK), bir taşıyıcının fazı sayısal işaretin iki seviyesine bağlı olarak iki değer arasında değiştirilir. Örneğin Şekil 6'daki PCM kodu için, "0" ve "1" işaretlerini iletmek için PSK işaretler;

$$\Phi_1(t) = A \sin(\omega_1 t + \theta_1) \quad 0 < t \leq T, 2T < t \leq 3T, 5T < t \leq 6T$$

$$\Phi_1(t) = A \sin(\omega_0 t + \theta_0) \quad T < t \leq 2T, 3T < t \leq 5T, 6T < t \leq 7T$$

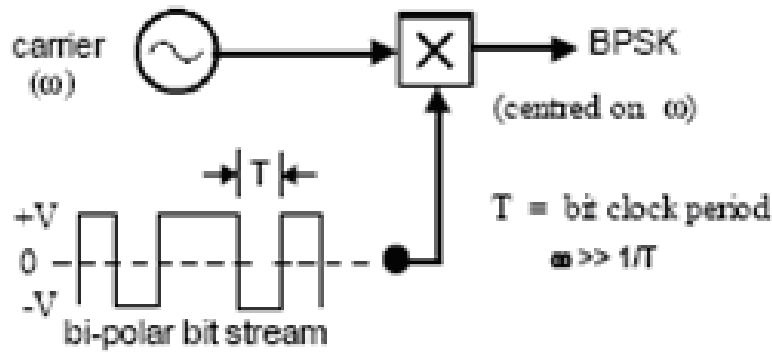
olarak seçilebilir. θ_0 ve θ_1 sabit faz kaymalarıdır. İkili PCM işaret için, $\theta_0 - \theta_1 = 180^\circ$ olması modülatör tasarımını basitleştirmektedir.



Şekil 6. PSK işaretin üretilmesi

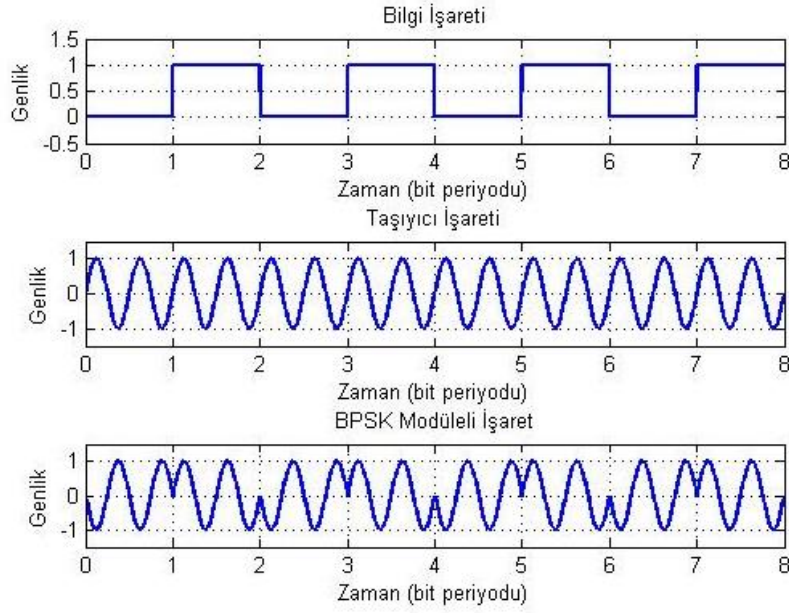
6.4.1 İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK)

Tek bir taşıyıcı frekansı için iki çıkış faz söz konusudur: (0 ve π) veya ($\frac{\pi}{2}$ ve $\frac{3\pi}{2}$). Girişteki sayısal işaret değiştiğinde taşıyıcının fazı iki açı değeri arasında kayar. Eğer sinüzoidal taşıyıcı iki durumlu bit dizisi tarafından modüle edilecekse çıkış işaretinin polaritesi bit dizisinin polaritesinin değiştiği noktada değişecektir. Bunu ifade eden blok diyagramı Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. BPSK işaretinin üretilmesi

Bit dizisi hakkındaki bilgi gönderilecek BPSK işaretinin fazının değişimlerini içermektedir. Bir senkron demodülatör bu faz değişimlerine duyarlı olması gerekmektedir. BPSK işaretinin zaman ifadesi Şekil 8’de verilmiştir.



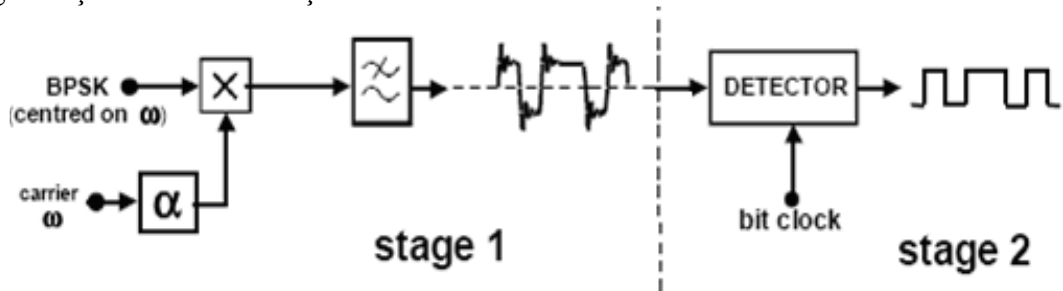
Şekil 8. BPSK işareti

Üsteki işaret ikili bilgi işaretidir. Şekil 8’deki dalga şekli hakkında önemli bir bilgi var. Dalga şekli her faz değişikliğinde simetrik bir yapı oluşturmaktadır. Bunun sebebi bit hızının taşıyıcı frekansının ($\frac{\omega}{2\pi}$) alt katları olmasıdır. Bu normalde özel bir durum olarak görülebilir ve her zaman pratikte gözlemlenemeyebilir. Bu durum alınan işaretten kolay bir şekilde bit dizisinin elde edilmesini sağlamaktadır. Verimli haberleşme sağlamak için bir bant sorunu olabilir, bu sorun (bant sınırlanması) ise ya temel-bant’da ya da taşıyıcı frekansında halledilmektedir.

BPSK işaretinin demodülasyonunu iki evrede inceleyebiliriz.

- I. Bant sınırlı bilgi işaretinin elde edilmesi ile temel banda dönüş.
- II. Bant sınırlı dalga biçiminden tekrar bit dizisinin elde edilmesi.

Yalnızca bunlardan birincisi bu deneyde ispatlanacaktır. Bu deneyde temel banda dönüş işlemi bir lokal senkronizasyonlu taşıyıcı (çalınmış taşıyıcı) ile sağlanacaktır. Bu yapının blok diyagramı Şekil 9’da verilmiştir.

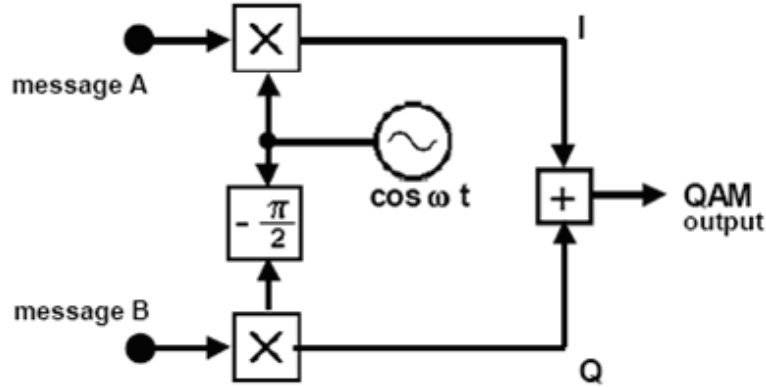


Şekil 9. BPSK senkronizasyon demodülasyonu

Dönüşüm süreci orijinal bit dizisini bize vermez fakat orijinal bit dizisinin bant sınırlı biçimini verir.

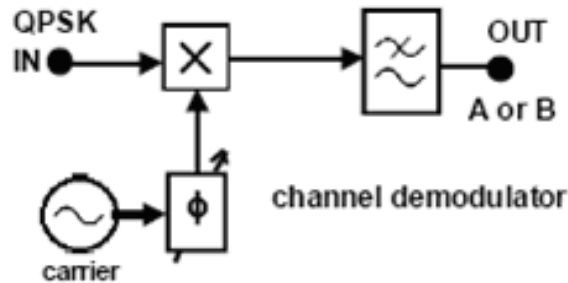
6.4.2 Dördöl Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK)

Birbirinden bağımsız iki tane A ve B analog işaret modülatörün girişine uygulanmaktadır. Modülatör önceleri QAM modülatörü olarak adlandırılrsa da, daha sonra QPSK modülatörü olarak adlandırılmaya başlanmıştır. Blok diyagramı Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Quadrator Modülatör (QPSK Modülatörü)

QPSK demodülatörü verici kısımda bilgi işaretinin A ve B gibi iki diziye ayrılıp sonra PSK işareti elde edildiği kabul edilmektedir. Daha sonra her iki PSK işareti taşıyıcıları ile fazları birbirine dik olacak şekilde eklenilmektedir. Bu demodülatör yapısı iki tane PSK demodülatöründen oluşmaktadır. Demodülatör çıkışları analog - sayısal dönüştürücüden sonra paralel-seri dönüştürücüsüne girmektedir. Bu deneyde demodülatör yapısı olarak tek bir işareti veren yapı kullanılacaktır. Bu demodülatör yapısı Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. QPSK demodülatör yapısı

Bu basit yapıda A/D ve paralel-seri dönüştürücüler kullanılmamaktadır. Bu yapı için A ve B işaretlerini elde etmek için uygun bir faz kaydırıcı kullanılacaktır.

6.5 BİT HATA ORANI (Bit Error Rate - BER)

Sayısal bilgi iletiminde gönderilen veri içindeki bozulan ya da yanlış algılanan bit oranını ifade eder. Bit hata sebepleri dâhili ve harici sebepler iki gruba ayrılır.

- Dâhili sebepler; bağlantı yapılırken, sistemin bileşenlerinden, tasarımından oluşan sebeplerdir.

- İç gürültü, kalitesiz elektrik bağlantıları, optik sürücü, optik alıcı, konektör, optik fiber bağlantıları yapılırken kullanılan malzemeler Kısaca zayıflama ve dispersiyon vs.
- Harici sebepler; dış kaynaklardan meydana gelir.
 - Güç kaynağındaki dalgalanmalar, elektrostatik boşalma, elektromanyetik parazitler, kablo veya konektörün titreşmesi vs.

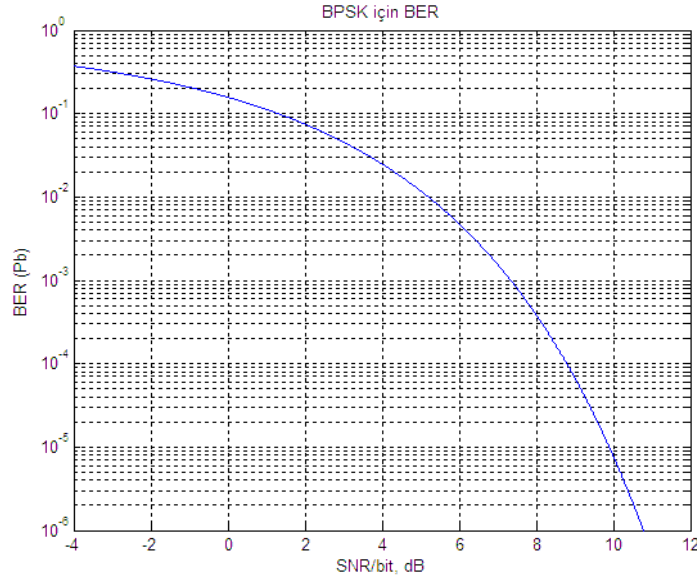
$$BER = \frac{\text{t zamanda alınan hatalı bit}}{\text{t zamanda alınan toplam bit}}$$

AWGN kanalı kullanılarak BPSK modülasyonu için bit hata oranı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{SNR}}{2\sqrt{2}}\right) \right]$$

Eşitlikte $Q(x)$, Q fonksiyonu olup E_b bit başına enerjiyi, N_0 ise gürültü güç spektral yoğunluğunu göstermektedir.



Şekil 12. BER ve SNR

Yüksek BER'de yani düşük SNR'de gecikme artar ve iş yapabilme yeteneği azalır. BER'in olabildiğince düşük olması istenir.

Deney 6.1 / Sinyal Üretme ve Örnekleme

```
clc; close all; clear;
n = input('n bit PCM sistem için n değerini giriniz: ');
n1 = input('Bir periyottan alınacak örnek sayısı: ');

% işaret üretme
x = 0:2*pi/n1:4*pi;          % n1: örnek sayısı.
s = 8*sin(x);
subplot(3,1,1);
plot(s);
title('Analog Sinyal');
xlabel('...');
ylabel('...');
subplot(3,1,2);
stem(s); grid on;
title('Örneklenmiş sinyal');
xlabel('...');
ylabel('...');
```

- n ve $n1$ değerlerini giriniz. Örneğin 3 bitlik DKM sisteminde bir periyottan alınacak örnek sayısı 16 olsun.
- xlabel ve ylabel parantez içlerini isimlendiriniz.

Deney 6.2 / Kuantalama

```
vmax = 8;
vmin = -vmax;
L = ...;          % kuantal seviyesi
a = ...;          % adım aralığı
part = vmin:a:vmax;
code = vmin-(a/2):a:vmax+(a/2);
[ind,q] = quantiz(s,part,code);
d1 = length(ind);
d2 = length(q);

for i = 1:d1
    if (ind(i) ~= 0)
        ind(i) = ind(i)-1;
    end
    i = i+1;
end
for i = 1:d2
    if (q(i) == vmin-(a/2))
        q(i) = vmin+(a/2);
    end
end
subplot(3,1,3);
stem(q); grid on;
title('Kuantalanmış sinyal');
ylabel('...');
xlabel('...');
```

- **Kuanta seviyesi** ve **adım aralığı** ifadelerini föyde ifade edildiği biçimde yukarıdaki kod parçasındaki değişkenlere dikkat ederek yerlerine yazınız.
- xlabel ve ylabel parantez içlerini isimlendiriniz.

Deney 6.3 / Kodlama

```
figure
code = de2bi(ind, 'left-msb');    % decimal to binary
k = 1;
for i = 1:d1
    for j = 1:n
        coded(k) = code(i,j);
        j = j+1;
        k = k+1;
    end
    i = i+1;
end
subplot(2,1,1); grid on;
stairs('?');

axis([0 100 -2 3]);
title('...');
ylabel('...');
xlabel('...');
```

- stairs komutunun içine for döngüsü ile oluşturulan değişkeni yazınız.
- title ve ylabel parantez içlerini isimlendiriniz.

Deney 6.4 / ASK – FSK - PSK

- Aşağıda ASK, FSK ve PSK ile ilgili verilen kodların devamı olarak çıkış işaretlerini gösteriniz.

```
% ask, fsk ve psk
clc; close all; clear all
f = 5;
f2 = 10;
N = 10;
X = randi([0 1],1,N); % input signal
nx = size(x,2);

i = 1;
while i < nx+1
    t = i:0.001:i+1;
    if x(i) == 1
        ask = sin(2*pi*f*t);
        fsk = sin(2*pi*f*t);
        psk = sin(2*pi*f*t);
    else
        ask = 0;
        fsk = sin(2*pi*f2*t);
        psk = sin(2*pi*f*t+pi);
    end

    subplot(3,1,1);
    plot(t,...);
    hold on;    grid on;
    title('...')

    subplot(3,1,2);
    plot(t,...);
    hold on;    grid on;
    title('...')

    subplot(3,1,3);
    plot(t,...);
    hold on;    grid on;
    title('...')

    i = i+1;
end
```