

Dr. Sadık YILDIZ

sadikyildiz06@gmail.com

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

2025– ANKARA

SAYISAL HABERLEŞME

6. Sayısal Taşıyıcı Modülasyonu

- Bu bölümde *sayısal geçişbandı iletimi için kullanılan modülasyon yöntemleri* ele alınmaktadır.
- Bölüm başında
 - *ikili genlik kaydırmalı anahtarlama*,
 - *ikili frekans kaydırmalı anahtarlama* ve
 - *ikili faz kaydırmalı anahtarlama* yöntemleri anlatılmaktadır.
- Daha sonra *bant genişliği* ve *güç kullanımı* açısından *verimli modülasyonlar* tanıtılarak, değişik *geçişbandı* modülasyon çeşitleri incelenmektedir.
- Bölüm sonunda *dikgen frekans bölüşümlü çoğullama (OFDM)* ele alınmaktadır.

6. Sayısal Taşıyıcı Modülasyonu

6.1. Sayısal İşaretlerin Geçişbandı İletimi

- **Modülasyon**, bir taşıyıcı işaretin *genlik, frekans veya faz* gibi özelliklerinin *bilgi işaretine bağlı olarak* değiştirilmesidir.
- Taşıyıcı işaretin amacı, bilgi işaretini vericiden alıcıya iletmektir.
- **Geçişbandı iletimi**, *çoğu haberleşme kanalının yüksek frekans aralığında çalışması* nedeniyle *tabanbant bilgi işaretinin* bu frekanslara kaydırılmasını gerektirir.
- Bu işlem, sinüs veya kosinüs biçiminde yüksek frekanslı bir taşıyıcı kullanılarak gerçekleştirilir.

6. Sayısal Taşıyıcı Modülasyonu

6.1. Sayısal İşaretlerin Geçişbandı İletimi

➤ *Geçişbandı modülasyonunun temel avantajları:*

1. İletim hattına uygunluk sağlar.
2. Farklı bilgi işaretlerinin aynı ortamda iletimine (*frekans bölüşümlü çoklu erişim*) imkân tanır.
3. Kablosuz sistemlerde *makul boyutta anten kullanımını* mümkün kılar.
4. *Frekans spektrumunun etkin kullanımıyla* sistemler arası *girişim azaltılır*.

6. Sayısal Taşıyıcı Modülasyonu

6.1. Sayısal İşaretlerin Geçişbandı İletimi

- **Sayısal geçişbandı modülasyonu**, *sayısal bir tabanbant işaretin sınırlı frekans bandında* bir **geçişbandı işaretime** dönüştürülmesidir.
- Bu modülasyon sırasında *taşıyıcının genliği, frekansı* veya *fazı bilgiye göre sınırlı sayıda değer alır*.
- Bu nedenle, **anahtarlama (shift keying)** terimi kullanılır.

6. Sayısal Taşıyıcı Modülasyonu

6.1. Sayısal İşaretlerin Geçişbandı İletimi

- Temel sayısal modülasyon türleri:
 - **ASK (Amplitude Shift Keying)**: Taşıyıcının genliği bilgiye göre değiştirilir.
 - **FSK (Frequency Shift Keying)**: Taşıyıcının frekansı bilgiye göre değiştirilir.
 - **PSK (Phase Shift Keying)**: Taşıyıcının fazı bilgiye göre değiştirilir.

- Bu modülasyon türleriyle, *sayısal bilgi taşıyan sürekli-zamanlı* sinyaller *geçişbandında iletilebilir*.

6.2. İkili Sayısal Geçişbandı Modülasyonları

- Sayısal taşıyıcı modülasyonunun temelini oluşturmakta
- Basit yapılarından dolayı uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır.
- İkili sistemlerde *sayısal bilgi* sadece iki adet sembol (*0 ve 1*) ile ifade edilir.
- Kullanılan modülasyon türüne bağlı olarak *taşıyıcının genliği, frekansı veya fazı* iletilecek *sayısal sembole bağlı olarak* sadece *iki değer arasında* değiştirilmektedir.

6.2.1. İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (BASK)

- *Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (ASK)*, sayısal haberleşmenin ilk örneklerinden biri olarak yirminci yüzyılın başlarında *kablosuz telgraf haberleşmesi için kullanılmaya* başlanmıştır.
- Tek başına ASK, diğer sayısal modülasyon türlerine göre *daha verimsiz olduğundan* ve *gürültüden daha fazla etkilendiğinden* günümüzde yaygın olarak kullanılmamaktadır.
- Genlik kaydırmalı anahtarlama *bilgi işareti*, *taşıyıcının genliğini* modüle etmektedir.
- BASK için sayısal bilginin *0* ve *1* sembollerini ifade etmek üzere taşıyıcının iki farklı genliği (A_0 ve A_1) kullanılmaktadır.
- *Taşıyıcının frekansı ve fazı sabit olup*, *taşıyıcı frekansı iletim yapılacak frekans bandına göre belirlenmekte*, *taşıyıcı fazı ise genelde sıfır olarak alınmaktadır*.
- Uygulamada taşıyıcı genlik değerlerinden birisinin sıfır seçilmesiyle *başla-dur anahtarlama (OOK)* gerçekleştirilebilmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.1. İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (BASK)

- BASK taşıyıcı frekansı f_c olmak üzere şu şekilde ifade edilir.

$$i(t) = \begin{cases} A_1 \cos 2\pi f_c t & , \text{ sayısal sembol 1 ise } (S_1(t)\text{ taşıyıcısı}) \\ A_0 \cos 2\pi f_c t & , \text{ sayısal sembol 0 ise } (S_0(t)\text{ taşıyıcısı}) \end{cases}$$

- OOK için genlik seviyelerinden birisi sıfır kabul edildiğinde taşıyıcı frekansı f_c olmak üzere şu şekilde ifade edilir

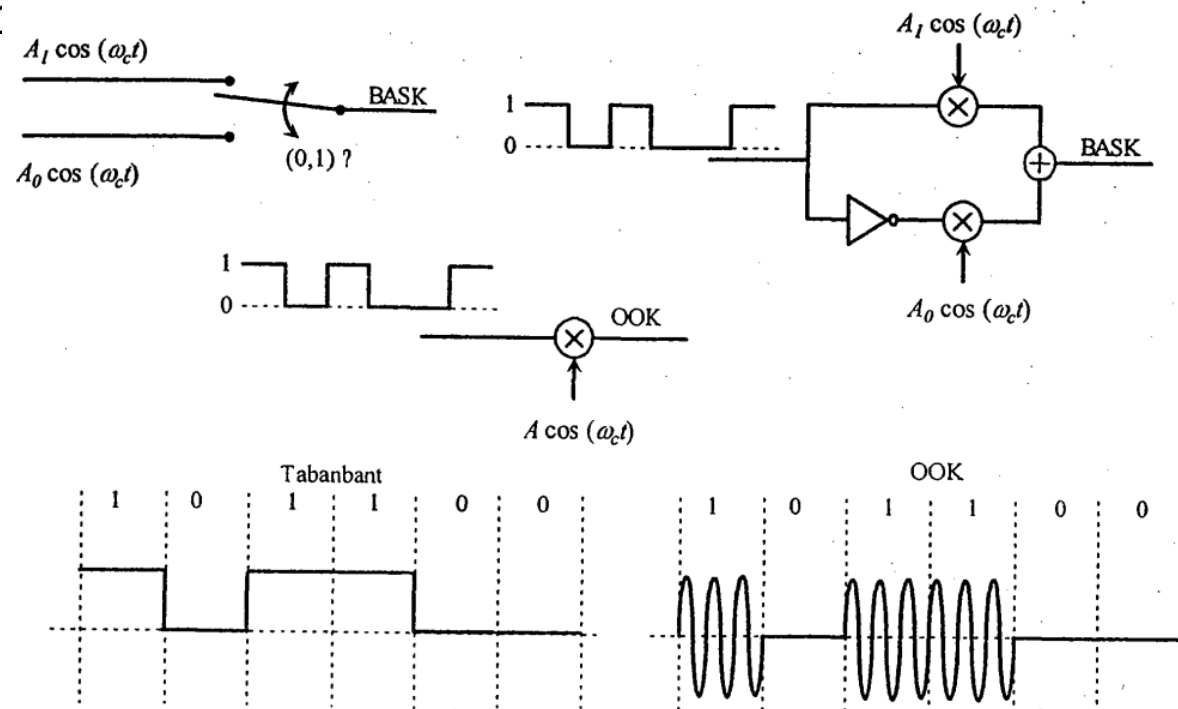
$$i(t) = \begin{cases} A_1 \cos 2\pi f_c t & , \text{ sayısal sembol 1 ise } (S_1(t)\text{ taşıyıcısı}) \\ 0 & , \text{ sayısal sembol 0 ise } (S_0(t)\text{ taşıyıcısı}) \end{cases}$$

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.1. İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (BASK)

BASK Modülasyonu:

➤ BASK modülatörü Şekil 6.1



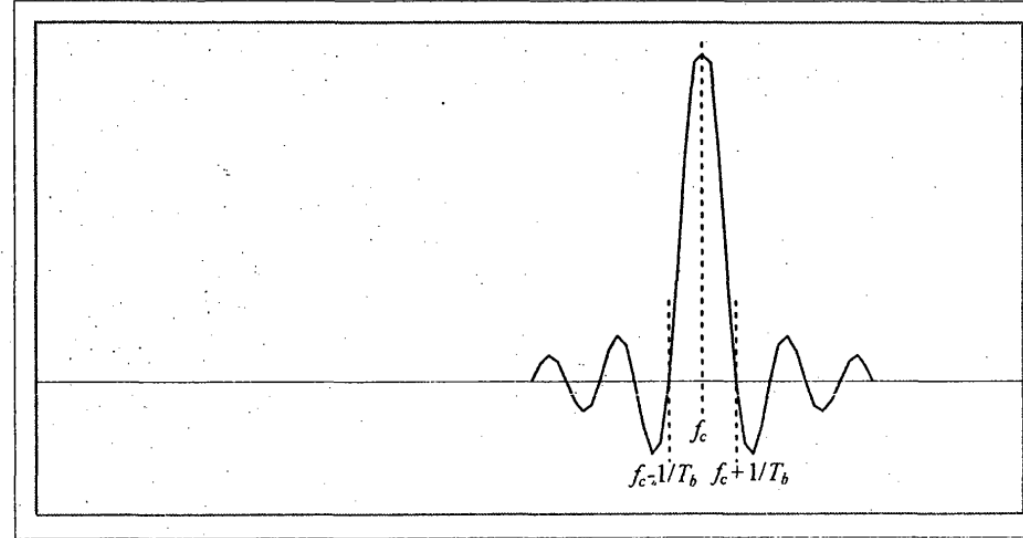
Şekil 6.1. BASK ile OOK Modülasyonu ve oluşan OOK işareti.

ır şeklinde gösterilmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.1. İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (BASK)

- BASK işaretinin frekans spektrumu için BASK işareti tek-kutuplu bir tabanbant işareti ile bir kosinüs dalgasının çarpımı ile ifade edilir.
- Bu nedenle zaman uzayında gerçekleştirilen çarpım işlemi sonucunda BASK spektrumu, tabanbant işaretinin spektrumu ile kosinüs dalgası spektrumunun konvolüsyonu şeklinde oluşmaktadır.
- Şekil 6.2'de dikdörtgensel bir tabanbant darbesi kullanılarak oluşturulan BASK işaretinin frekans spektrumu gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Dikdörtgensel tabanbant darbeleri kullanılarak oluşturulan BASK işaretinin frekans spektrumu.

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.1. İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (BASK)

- Taşıyıcı frekansı f_c , merkez olmak üzere genelde spektrumun merkez genişliği BASK işaretinin bant genişliği olarak alınmakta ve bu durumda T_b , bit zaman-dilimi süresini gösterdiği taktirde BASK işaretinin bant genişliği şu şekilde kabul edilir,

$$B_{BASK} = 2/T_b$$

- Tabanbant bilgi işaretinde dikdörtgensel darbe yerine biçimlendirilmiş bir darbe şekli kullanıldığında, modüle edilmiş işaretin bant genişliği tabanbant darbesinin bant genişliğine bağlı olarak değişmektedir.
- Genlik modülasyonunda tabanbant bilgi işareti ile kosinüs taşıyıcısı doğrudan çarpıldığı için, *tabanbant işaretinin frekans spektrumu taşıyıcı frekansına kaymakta* ve *bunun neticesinde iletim için gerekli bant genişliği tabanbant işaretinin bant genişliğinin iki katına eşit olmaktadır.*

6.2.1. İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (BASK)

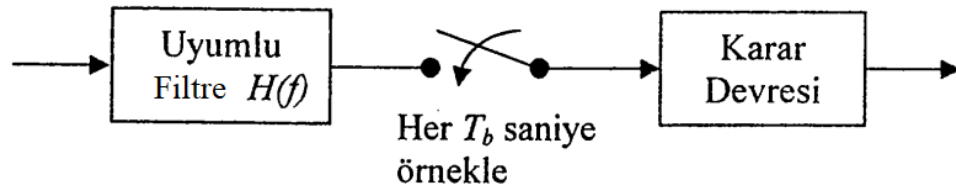
BASK Demodülasyonu:

- Taşıyıcı modülasyonu kullanılan sistemlerde, alıcı tarafında bilgi işaretinin geri elde edilmesi için demodülasyon işlemi gereklidir.
- Alıcı, gürültüyle bozulmuş bir geçişbandı işaretini alır ve bu işaretten hangi sembolün gönderildiğini belirlemeye çalışır.
- Demodülasyon yöntemleri genel olarak ikiye ayrılır:
 - **Eşevreli (koherent) demodülasyon:** Taşıyıcı frekansına kilitli bir sinüzoidal referans işareti kullanılır.
 - **Eşevresiz (koherentsiz) demodülasyon:** Yerel taşıyıcıya ihtiyaç duyulmaz.

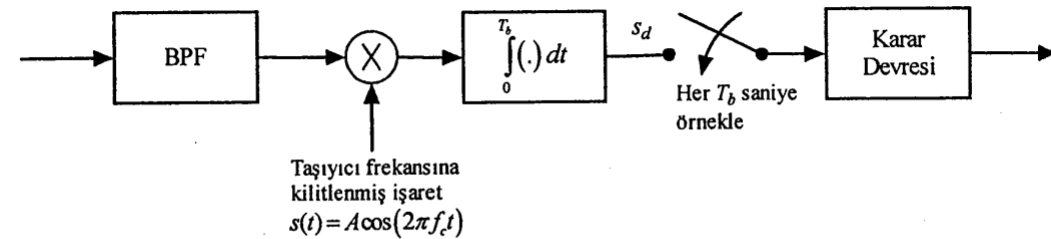
6.2.1. İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (BASK)

BASK Demodülasyonu:

- Demodülatör yapısı Şekil 6.3'de gösterildiği gibi oluşmakta ve karar devresinde, uyumlu filtre çıkışındaki değere bağlı olarak hangi sembolün alındığına karar verilmektedir.
- BASK için eşevreli demodülasyon yapılabilir. Bu yöntemde, alınan geçişbandı işareti önce bir **bant geçiren filtre (BPF)** yardımıyla istenilen frekans aralığına indirgenir.
- Ardından, bu işaret taşıyıcı ile çarpılır ve **integral alıcı** üzerinden geçirilerek işaret ile taşıyıcı arasında korelasyon kurulur (Şekil 6.4).



Şekil 6.3. Uyumlu süzgeç kullanarak taşıyıcı demodülasyonu.



Şekil 6.4. Eşevreli BASK Demodülasyonu.

6.2.1. İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (BASK)

BASK Demodülasyonu:

- Demodülasyon çıkış değeri taşıyıcının varlığına bağlı olarak değişir. Örneğin, **başla-dur (OOK)** modülasyonunda;
- 0 sembolü için $S_0(t) = 0$
 - 1 sembolü için $S_1(t) = A \cos(2\pi f_c t)$ seçildiğinde

$$s_{d0} = \int_0^{T_b} s_0(t)s(t)dt = \int_0^{T_b} 0 \times A \cos 2\pi f_c t \, dt = 0 \quad , \quad 0 \text{ alındığında}$$
$$s_{d1} = \int_0^{T_b} s_1(t)s(t)dt = \int_0^{T_b} A \cos 2\pi f_c t \times A \cos 2\pi f_c t \, dt = \frac{A^2}{2} T_b \quad , \quad 1 \text{ alındığında}$$

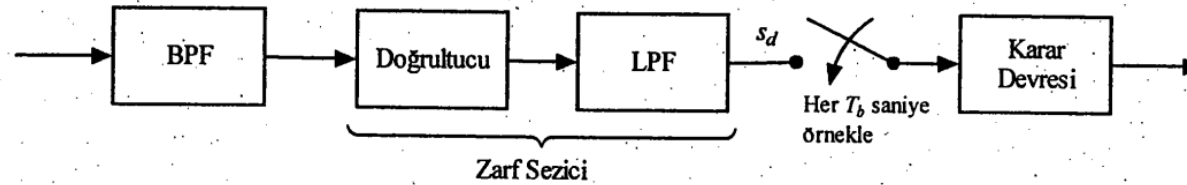
(6. 4)

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.1. İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (BASK)

BASK Demodülasyonu:

- Eşevreli olmayan BASK demodülasyonu için doğrultucu ve alçak-geçiren filtre (LPF) elemanlarından oluşan bir zarf sezici kullanılmaktadır.
- Şekil 6.5'de gösterilen eşevreli olmayan alıcının yapısındaki zarf sezici doğrudan taşıyıcının genliğini elde etmektedir. Karar devresi, zarf sezicide bulunan genliğe göre hangi sayısal sembolün alınmış olduğuna karar vermektedir.



Şekil 6.5. Eşevreli olmayan BASK Demodülasyonu.

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.1. İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (BASK)

- **Örnek 6. 2:** Matlab kullanarak toplanır beyaz Gauss gürültüsü kanalından BASK iletiminin benzetimini yapınız.
- **Çözümü:** Matlab komutları genlik modülasyonu yaparken negatif değerleri de genlik gibi kullanmaktadır. Esasında negatif değerler genlik değişimi olmayıp (genlik her zaman mutlak ve bu nedenle pozitiftir) faz kaymasına karşılık geldiğinden aşağıda verilen programda modülasyon için hazır komut kullanımı yerine doğrudan kosinüs dalgasının genliği bilgiye bağlı olarak değiştirilmektedir.

```
1 - fd = 1000;
2 - fs = 100000;
3 - fb = fs / fd;
4 - Tb = 1 / fb;
5 - fc = 4000;
6 - P = 1000;
7 - M = 2;
8 - sigma = 2;
9
10 - xmit = randi([0 M-1], P, 1); % randint yerine randi
11
12 - t = 0:(fs-1)/fd;
13 - t = t / fs;
14
15 - y = xmit(1) * cos(2 * pi * fc * t);
16 - for i = 2:P
17 -     s = xmit(i) * cos(2 * pi * fc * t);
18 -     y = [y, s];
19 - end
20
21 - n = sigma * randn(size(y));
22 - rec = y + n;
23
24 - rec = reshape(rec, fb, P);
25
26 - ref = cos(2 * pi * fc * t);
27 - ds = (2 / fb) * rec' * ref';
28
29 - dec = double(ds > 0.5);
30
31 - [num, rat] = biterr(xmit, dec);
32 - fprintf('Bit Hata Sayısı: %d\nBit Hata Oranı: %.4f\n', num, rat);
```

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.1. İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (BASK)

➤ Örnek

```

1 % İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama (BASK) Modülasyonu Örneği
2 clc; clear; close all;
3
4 % Parametreler
5 bit_count = 8; % Bit sayısı
6 data = randi([0 1], 1, bit_count); % Rastgele bit dizisi
7 Tb = 1; % Bit süresi (saniye)
8 Fs = 1000; % Örneklem frekansı
9 Fc = 5; % Taşıyıcı frekansı (Hz)
10 A1 = 1; % Bit 1 için genlik
11 A0 = 0; % Bit 0 için genlik (yani sinyal yok)
12
13 % Zaman vektörü (her bit için Tb saniye, Fs*Tb örnek)
14 t = linspace(0, Tb, Fs*Tb);
15 modulated_signal = [];
16
17 % ASK Modülasyonu
18 for i = 1:length(data)
19     if data(i) == 1
20         s = A1 * cos(2*pi*Fc*t);
21     else
22         s = A0 * cos(2*pi*Fc*t);
23     end
24     modulated_signal = [modulated_signal s];
25 end
26
27 % Veri sinyali (bitleri zaman eksenine genişletiyoruz)
28 data_signal = repelem(data, Fs*Tb);
29
30 % Genel zaman eksenini
31 time_axis = linspace(0, bit_count*Tb, bit_count*Fs*Tb);
32
33 % Grafikler
34 figure;

```

