

Dr. Sadık YILDIZ

sadikyildiz06@gmail.com

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

2025– ANKARA

6. Sayısal Taşıyıcı Modülasyonu

- *ikili genlik kaydırmalı anahtarlama,*
- *ikili frekans kaydırmalı anahtarlama ve*
- *ikili faz kaydırmalı anahtarlama yöntemleri anlatılmaktadır.*

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.2. İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (BFSK)

- *Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (FSK),*
- Genlik kaydırmalı anahtarlamaya oranla gürültüden daha az etkilenmektedir.
- Bu nedenle FSK günümüzde *amatör radyo veri iletimi* gibi *düşük-hızlı haberleşme* sistemlerinde kullanılabilir.
- *İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (BFSK)* iletiminde *sayısal bilginin 0 ve 1 bitlerine* bağlı olarak *taşıyıcının iki farklı frekansı* (f_0 ve f_1) kullanılmakta olup *genliği ve fazı sabit* tutulmaktadır.
- *Taşıyıcı genliği kullanılan güç ve istenen hata olasılığına göre* belirlenmekte ve *taşıyıcı fazı ise genelde sıfır olarak* alınmaktadır.
- BFSK için iletilen işaret genel olarak şu şekilde ifade edilmektedir.

$$i(t) = \begin{cases} A \cos 2\pi f_1 t & , \text{ sayısal sembol 1 ise } (s_1(t) \text{ taşıyıcısı}) \\ A \cos 2\pi f_0 t & , \text{ sayısal sembol 0 ise } (s_0(t) \text{ taşıyıcısı}) \end{cases}$$

➤ .

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.2. İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (BFSK)

- BFSK için iletilen işaret genel olarak şu şekilde ifade edilmektedir.

$$i(t) = \begin{cases} A \cos 2\pi f_1 t & , \text{ sayısal sembol 1 ise } (s_1(t) \text{ taşıyıcısı}) \\ A \cos 2\pi f_0 t & , \text{ sayısal sembol 0 ise } (s_0(t) \text{ taşıyıcısı}) \end{cases}$$

- BFSK sisteminde iletim için kullanılan taşıyıcı frekansın orta noktası f_c şu şekilde tanımlanır,

$$f_c = \frac{f_0 + f_1}{2}$$

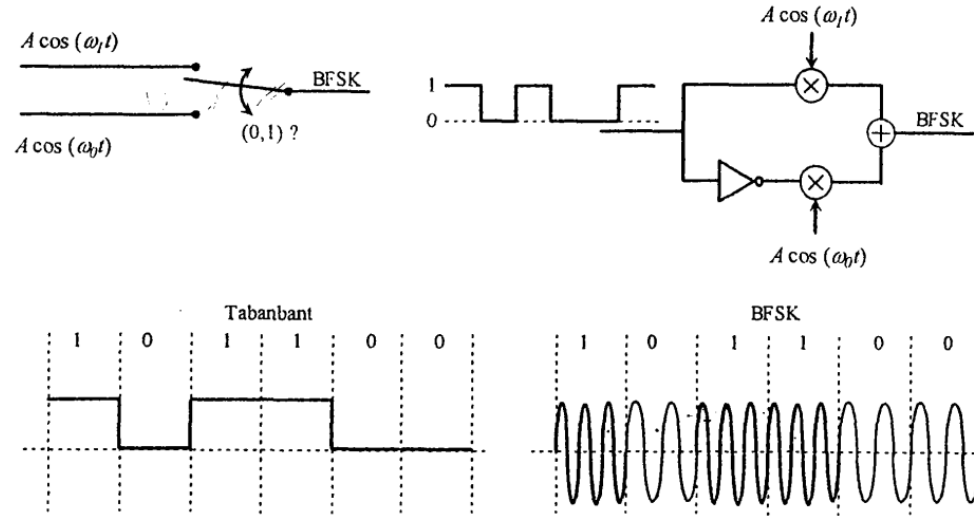
- Frekans sapması da Δf olmak üzere taşıyıcı frekansları şu şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} f_0 &= f_c - \Delta f \\ f_1 &= f_c + \Delta f \end{aligned}$$

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.2. İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (BFSK)

- **BFSK Modülasyonu:**
- BFSK modülatörü Şekil 6.6.'da görüldüğü gibi *sembol değerine göre konum alan bir anahtara bağlı olarak* iletilecek işaretin *iki farklı frekanstaki taşıyıcı arasından seçilmesi* şeklinde gösterilebilmektedir.
- BFSK işareti basit anlamda *0 ve 1 bilgi sembolleri için farklı frekanstaki iki BASK işaretinin toplamı olarak* oluşturulabilmektedir.
- Sayısal *tek-kutuplu tabanbant işareti* ile *birinci frekanstaki taşıyıcı* doğrudan çarpılmakta,
- Sayısal *tek-kutuplu tabanbant işaretinin tersi* ile de *ikinci frekanstaki taşıyıcı çarpılmakta*
- Bu iki işaretin *toplanması* sonucunda **BFSK işareti** elde edilebilmektedir.

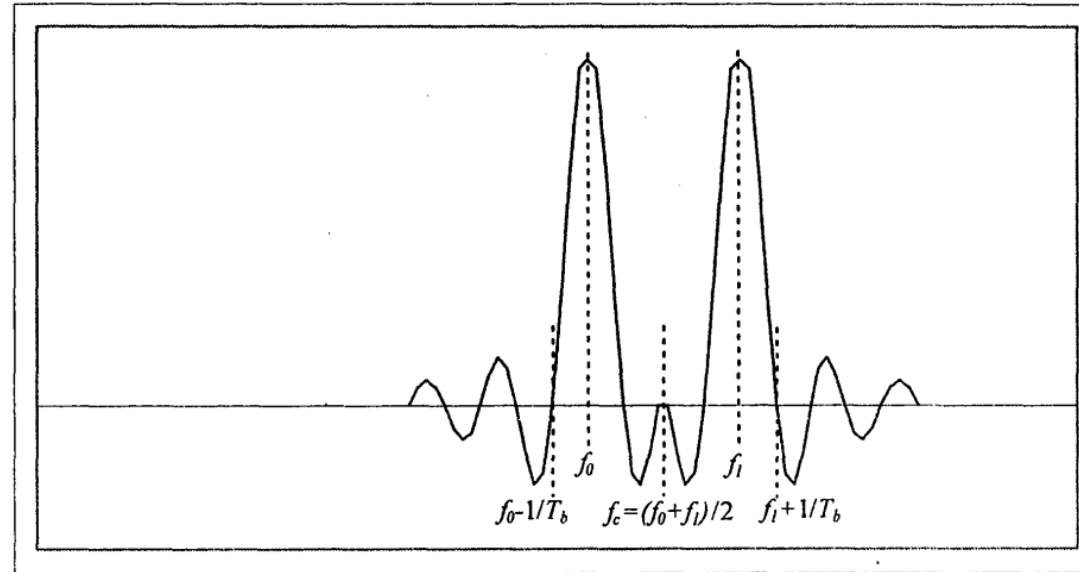


Şekil 6.6. BFSK Modülasyonu.

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.2. İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (BFSK)

- BFSK işaretinin frekans spektrumu farklı frekanstaki iki BASK işaretinin toplamı olarak düşünülebilmektedir.
- Bu durumda BFSK spektrumu f_0 ve f_1 , frekanslarında oluşan iki adet BASK spektrumunun toplamı şeklinde elde edilmektedir.
- Şekil 6.7'de **BFSK işaretinin**, **tabanbantta dikdörtgensel darbe biçimi kullanıldığında** oluşan frekans spektrumu gösterilmektedir.



Şekil 6.7. Dikdörtgensel darbe kullanan BFSK Frekans Spektrumu.

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.2. İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (BFSK)

- Merkez taşıyıcı frekansı f_c BFSK işaret spektrumunun merkezini göstermektedir.
- BFSK işaretinin *bant genişliği*, *spektrum bileşenlerinin ana göbeği dikkate alındığında* ve *tabanbantta dikdörtgensel darbeler kullanıldığında* BFSK Şu şekilde ifade edilir.

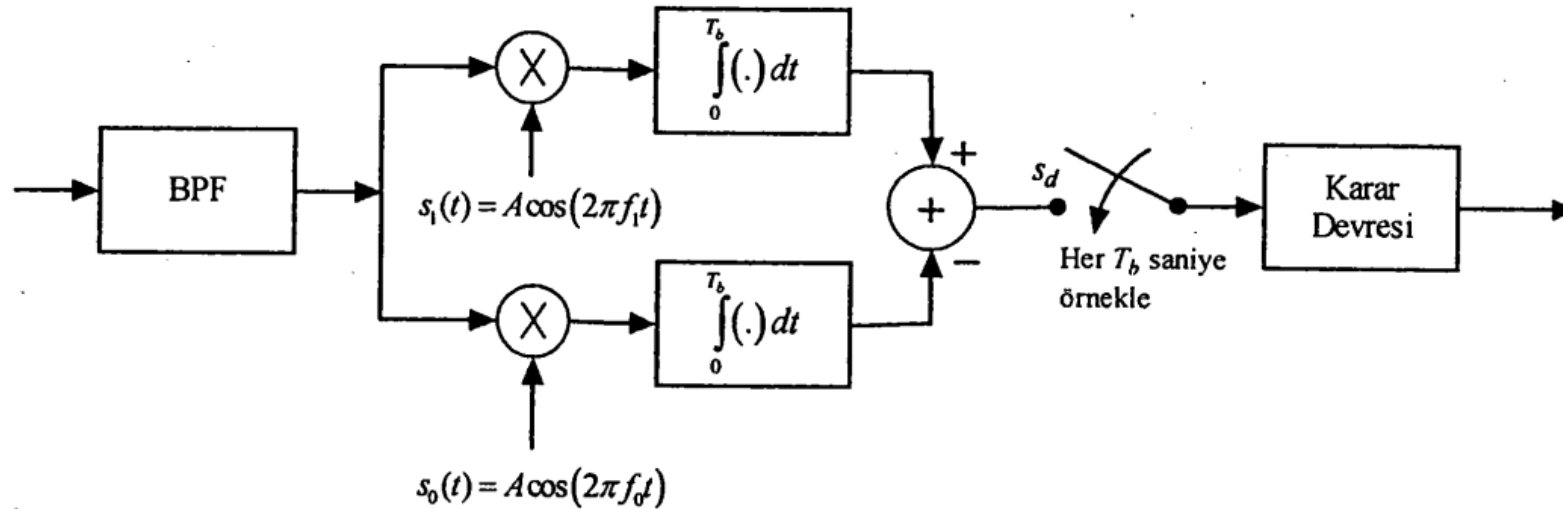
$$B_{BFSK} = (f_1 - f_0) + \frac{2}{T_b}$$

- BFSK spektrumunda her iki frekans bileşeni için de gerekli *frekans bant genişliğinin* ayrılması gerektiğinden iletim bant genişliği *frekans spektrum bileşenlerinin kapsadığı toplam frekans bandı* olarak alınmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.2. İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (BFSK)

- **BFSK Demodülasyonu:**
- BFSK işaretinin demodülasyonu için *eşevreli demodülasyon* ve *eşevreli olmayan demodülasyon sistemleri* kullanılabilir.
- Eşevreli demodülasyon için ilinti (korelasyon) alıcısı yapısından faydalanılmaktadır.
- BFSK için iki farklı frekansa sahip taşıyıcı kullanıldığından demodülatörde tipik olarak *iki adet paralel çalışan ilinti alıcısı* kullanılabilir.
- Şekil 6.8'de gösterilen eşevreli BFSK alıcısında üst kolda ilk frekanstaki taşıyıcı ile, alt kolda ise diğer taşıyıcı ile ilinti alınmaktadır.



Şekil 6.8. Eşevreli BFSK Demodülasyonu.

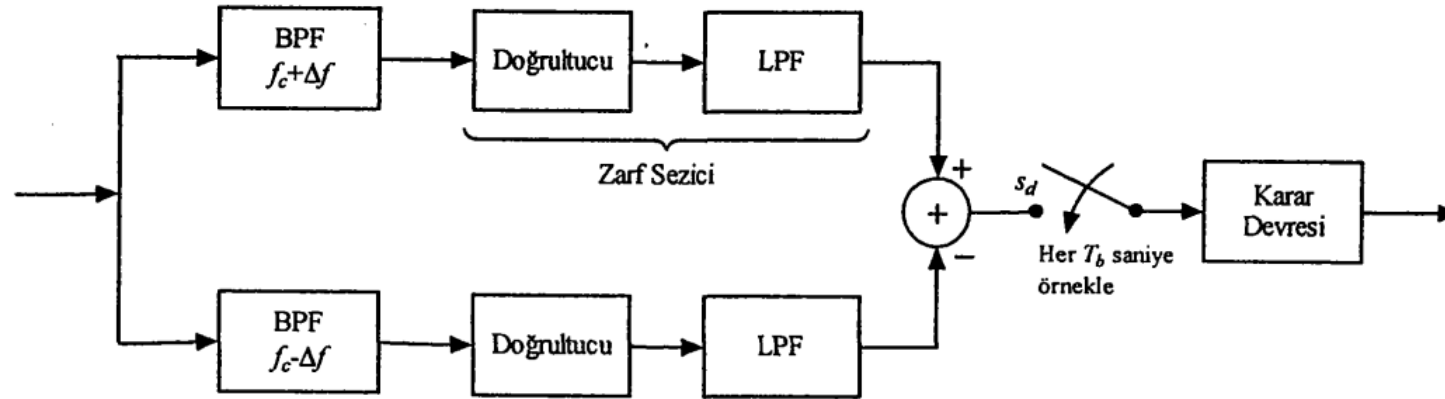
6.2.2. İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (BFSK)

- **BFSK Demodülasyonu:**
- Uygulamada, taşıyıcılardan sadece bir tanesi için ilinti işlemi gerçekleştiren tek bir ilinti alıcı kolu kullanılabilmektedir.
- Bu durumda ilinti alıcısının çıkışı yüksek olduğunda yerel referans frekansındaki taşıyıcının iletildiği, ilinti alıcısının çıkışı düşük olduğunda ise diğer frekanstaki taşıyıcının iletildiği anlaşılabilmektedir.
- Fakat bu durumda alıcı gürültüden daha fazla etkilenmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.2. İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (BFSK)

- **BFSK Demodülasyonu:**
- BFSK işareti, taşıyıcıları $f_c + \Delta f$ ve $f_c - \Delta f$ olan iki OOK işaretinin toplamı olarak düşünülebileceğinden, eşevreli olmayan BFSK demodülasyonu için, aynen BASK demodülasyonunda olduğu gibi zarf sezicilerinin kullanımı mümkün olmaktadır.
- Bunun için öncelikle $f_c + \Delta f$ ve $f_c - \Delta f$ frekanslarındaki OOK işaretlerinin ayrıştırılması gerekmektedir.
- Bu amaçla da Şekil 6.9'da gösterildiği gibi iki paralel koldan birinde $f_c + \Delta f$ frekansı civarını geçiren bir bant geçiren filtre ve diğerinde $f_c - \Delta f$ frekansı civarını geçiren bir bant geçiren filtre kullanılabilmektedir. Bu aşamadan sonra ayrıştırılan işaretler zarf sezicisine verilerek OOK işaretinin genliği bulunmaktadır.



Şekil 6.9. Eşevreli Olmayan BFSK Demodülasyonu.

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.2. İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK)

- *Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK)*, gürültüden en az etkilenen sayısal modülasyon türüdür.
- Bu nedenle *uydu haberleşmesi gibi orta-hızlı ve yüksek-hızlı sayısal haberleşme sistemlerinde* kullanılmaktadır.
- Faz kaydırmalı anahtarlama, günümüzde birçok sayısal haberleşme sisteminde kullanılan üst seviyeli modülasyon yöntemlerinin temelini teşkil etmektedir.
- *İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK)* için *sayısal bilginin 0 ve 1 bitlerine bağlı olarak taşıyıcının iki farklı fazı ϕ_0 ve ϕ_1 kullanılmaktadır.*
- Faz kaydırmalı anahtarlama *taşıyıcının genliği ve frekansı sabittir.*
- *Taşıyıcı genliği* kullanılan güç ve istenen hata olasılığı ihtiyaçlarına bağlı olarak, *frekansı ise* iletim yapılacak banda göre belirlenmektedir.
- İkili işaretleşme için genel uygulamada *gürültüden en az etkilenilmesi amacıyla* iki taşıyıcı arasında **180° (π radyan)** faz farkının kullanıldığı *faz tersinim anahtarlaması (PRK)* kullanılmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.2. İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK)

- BPSK için taşıyıcı frekansı f_c olmak üzere iletilen işaret şu şekilde ifade edilmektedir.

$$i(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \phi_1) & , \text{ sayısal sembol 1 ise } (s_1(t) \text{ taşıyıcısı}) \\ A \cos(2\pi f_c t + \phi_0) & , \text{ sayısal sembol 0 ise } (s_0(t) \text{ taşıyıcısı}) \end{cases}$$

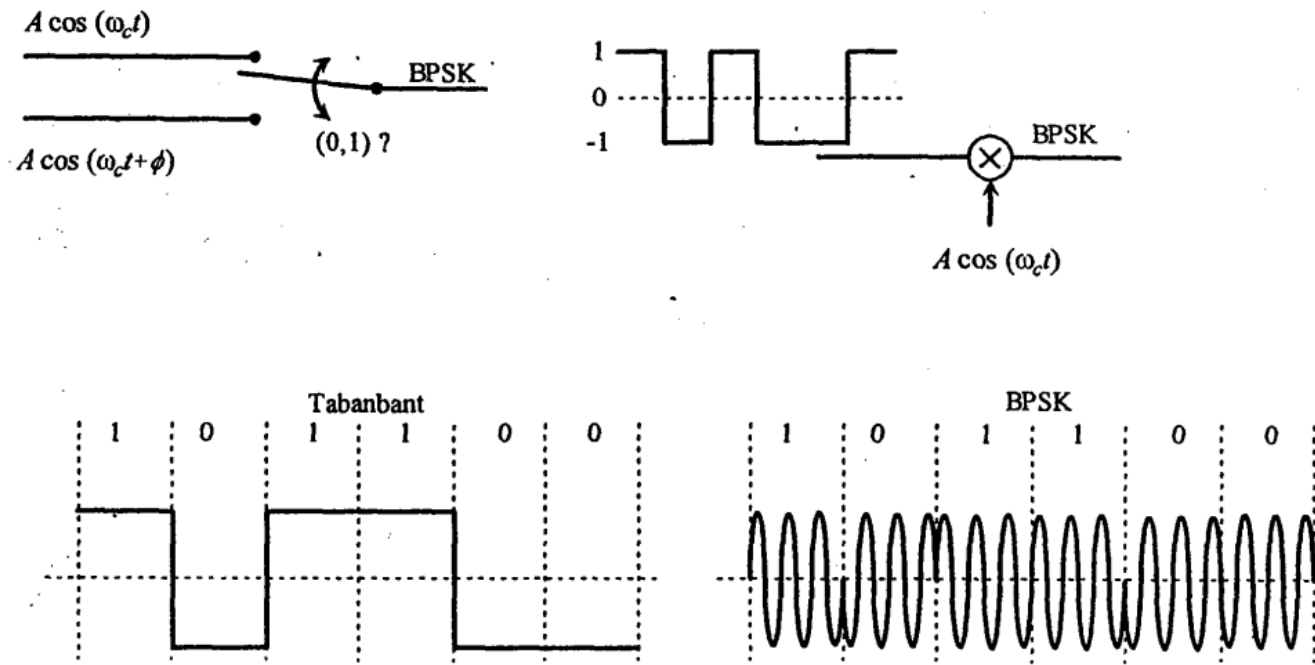
- PRK için taşıyıcı frekansı f olmak üzere, tipik olarak sembollerden biri için sıfır derece, diğer sembol için ise 180° (π radyan) fazlı taşıyıcılar kullanılmaktadır. Bu durumda iletilen işaret şu şekilde ifade edilir.

$$i(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & , \text{ sayısal sembol 1 ise } (s_1(t) \text{ taşıyıcısı}) \\ A \cos(2\pi f_c t + \pi) & , \text{ sayısal sembol 0 ise } (s_0(t) \text{ taşıyıcısı}) \end{cases}$$

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.2. İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK)

- **BPSK Modülasyonu:**
- BFSK modülasyonu Şekil 6.13'de görüldüğü gibi sembole bağlı olarak konumu belirlenen bir anahtar şeklinde gösterilebilmekte ve *kutuplu bir tabanbant bilgi işareti* ile *kosinüs taşıyıcısının çarpıldığı* bir sistem şeklinde oluşturulabilmektedir.

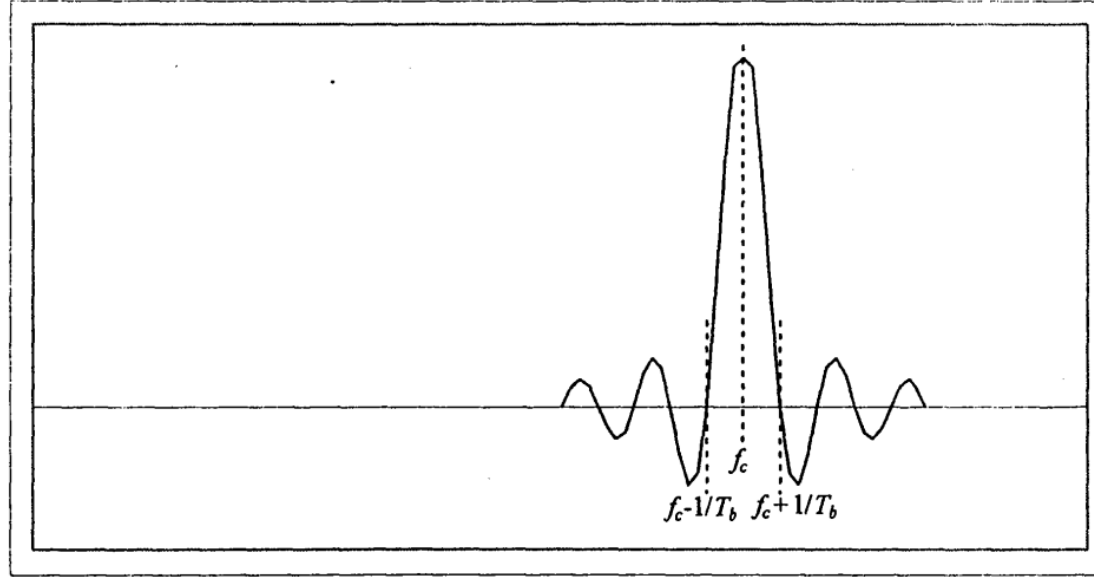


Şekil 6.13. BPSK Modülasyonu.

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.2. İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK)

- **BPSK Modülasyonu:**
- BPSK işareti *kutuplu bir tabanbant işareti* ile *bir kosinüs dalgasının çarpımı* olarak elde edildiği için *BPSK spektrumu, tabanbant işaretinin spektrumu ile kosinüs dalgasının spektrumunun konvolüsyonu şeklinde bulunabilmektedir.*
- Tipik BPSK spektrumu Şekil 6.14'te gösterilmektedir.
- Taşıyıcı frekansı f_c merkez olmak üzere, dikdörtgensel bir darbe kullanıldığında, spektrumun merkez göbek genişliği alınarak BPSK işaretinin bant genişliği $B_{BPSK} = 2/T_b$, olarak bulunmaktadır.
- BPSK üretimi için biçimlendirilmiş bir tabanbant darbesi kullanılarak bant genişliği azaltılabilmektedir.

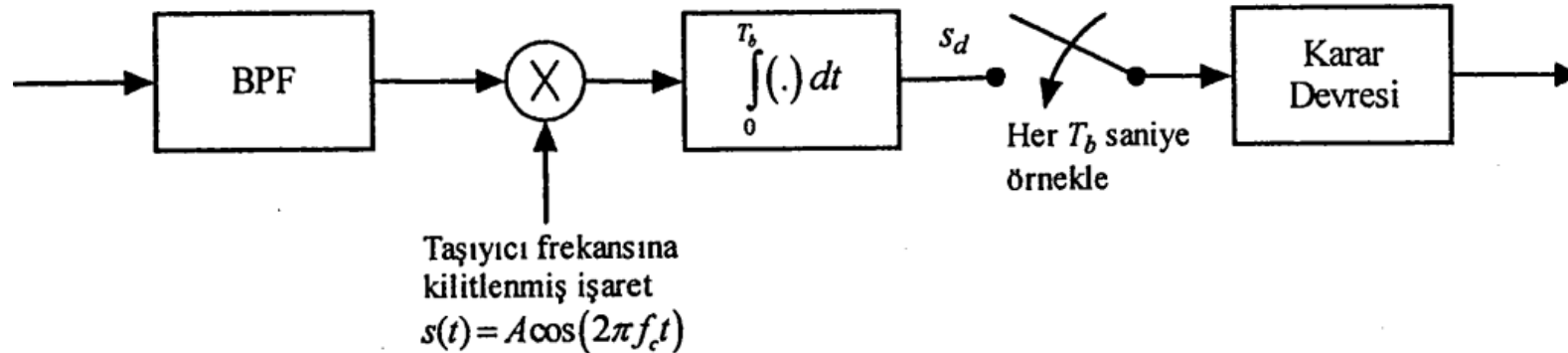


Şekil 6.14. Dikdörtgensel darbe kullanan BPSK frekans spektrumu.

SAYISAL HABERLEŞME

6.2.2. İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK)

- **BPSK Demodülasyonu:**
- PSK'da taşıyıcıların *hem genliği hem de frekansı* aynı olduğundan zarf sezici kullanılarak *genlik farkına bağlı bir sezinleme yapılamamaktadır.*
- Ayrıca farklı frekanslarda bant geçiren filtreler kullanarak taşıyıcıların ayırt edilmesi de mümkün olmamaktadır.
- Bu nedenle PSK demodülasyonu için zarf seziciden faydalanan eşevreli olmayan demodülasyon yaklaşımı kullanılamamaktadır.
- **BPSK demodülasyonu için sadece eşevreli demodülasyon yöntemi kullanılabildiğinden** alıcıda mutlaka taşıyıcı frekansına ve fazına kilitlenmiş bir sinüzoidal demodülasyon işaretine ihtiyaç duyulmaktadır.
- Eşevreli BPSK demodülasyonu için doğrudan Şekil 6.4'de gösterilen **eşevreli BASK demodülatörü** kullanılabilmektedir.



Şekil 6.4. Eşevreli BASK Demodülasyonu.

SAYISAL HABERLEŞME

- **ÖDEV:**
- Çok seviyeli Geçişbandı modülasyonları
 - M'li PSK
 - M'li FSK
- Çeşitli Geçişbandı Modülasyonları
 - Genlik-Faz Anahtarlama ve QAM
 - QPSK
 - OQPSK
 - MSK
 - GMSK
- Modülasyon türlerini araştırarak örnek MATLAB m-file ve Simulink uygulamaları ile açıklayınız