

Dr. Sadık YILDIZ

sadikyildiz06@gmail.com

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

2025– ANKARA

3. Analog/Sayısal Dönüşüm

- 3.1 Analog/sayısal Dönüşümün Aşamaları
- 3.2 Örneklemeye
- 3.3 Kuantalama (Nicemleme -Sinyal İşleme)
- 3.4. Darbe Kod Modülasyonu (PCM)

SAYISAL HABERLEŞME

3. Analog/Sayısal Dönüşüm

- Haberleşmede kullanılan işaretlerin önemli bir bölümü analog yapıdadır.
- Analog işaretlerin sayısal haberleşme sistemlerinde iletilebilmesi için işaretlerin öncelikle sayısal biçime dönüştürülmesi gerekmektedir.
- Analog/Sayısal dönüşüm sonrasında sayısal haberleşme sistemlerinden iletim gerçekleştirilebilmekte
- Alıcıda Sayısal/Analog dönüşüm ile analog yapıdaki bilgi işareti geri oluşturulabilmektedir.
- Analog/Sayısal dönüşümün temel aşamaları **örnekleme**, **kuantalama** ve **darbe kod modülasyonu (PCM)** olarak sınıflandırılabilir.

3. 1. Analog/sayısal Dönüşümün Aşamaları

➤ Analog İşaretlerin Sayısallaştırılması

- **Neden Sayısallaştırma?**

Analog işaretler, sayısal işleme ve iletim yöntemlerinin avantajlarından yararlanmak için sayısal hale dönüştürülmelidir.

- **Analog/Sayısal Dönüşüm Süreci**

Örnekleme: Analog işaretlerden belirli zaman aralıklarında örnekler alınarak zaman uzayında ayrık hale getirilir.

Kuantalama: Örneklenen işaretin genlik değerleri belirli seviyelere yuvarlanarak sınırlanır.

Kodlama (PCM - Darbe Kod Modülasyonu): Kuantalanan değerler sayısal kodlara dönüştürülerek sayısallaştırma tamamlanır.

Sayısal/Analog Dönüşüm (DAC): Sayısallaştırılan işaretler, ihtiyaç halinde tekrar analog formata dönüştürülebilir.

- Bu süreç sayesinde sayısal haberleşme sistemleriyle veri iletimi gerçekleştirilebilir.

3. 2. Örnekleme

1. İdeal Dürtü Örneklemesi
2. Doğal Örnekleme
3. Örnek ve Tut (Düz tepeli Örnek) (Düz tepeli Örnek)
4. Bant Geçiren İşaretlerin Örneklemesi

SAYISAL HABERLEŞME

3. 2. Örnekleme

➤ Örnekleme Nedir?

Analog işaretlerden belirli zaman aralıklarında örnekler alınarak ayırık-zamanlı işaret elde edilir. Böylece sürekli analog işaret, zaman uzayında sayısallaştırılır.

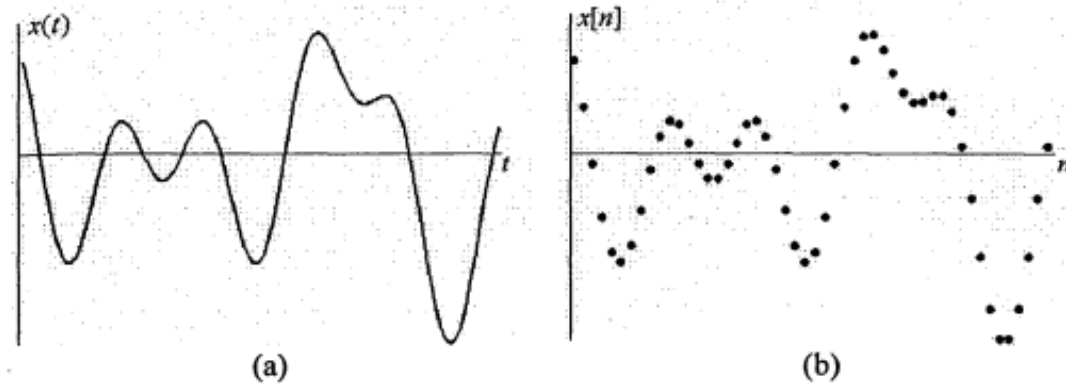
➤ Örnekleme Parametreleri

- **Örnekleme Periyodu (T):** Ardışık örnekler arasındaki süredir.
- **Örnekleme Frekansı ($f_o = 1/T$):** Bir saniyede alınan örnek sayısını belirtir.
- Örneğin $f = 10$ kHz ise saniyede 10.000 örnek alınır ve $T = 100$ μ s olur.
- **Bilgi Kaybı ve Örnekleme Oranı:**
- İki örnek arasındaki işaret değerleri atılır, bu yüzden mümkün olduğunca fazla örnek alınması bilgi kaybını önler.
- Ancak fazla örnek almak, veri işleme ve iletim maliyetini artırır.
- Minimum örnekleme frekansı, kayıpsız bilgi aktarımı için belirlenmelidir ve işaretin değişim hızına bağlıdır.
- **Frekans Spektrumu Önemi:**
- Yavaş değişen işaretler için daha az örnek yeterlidir.
- Hızlı değişen işaretler için daha fazla örnek gerekir.

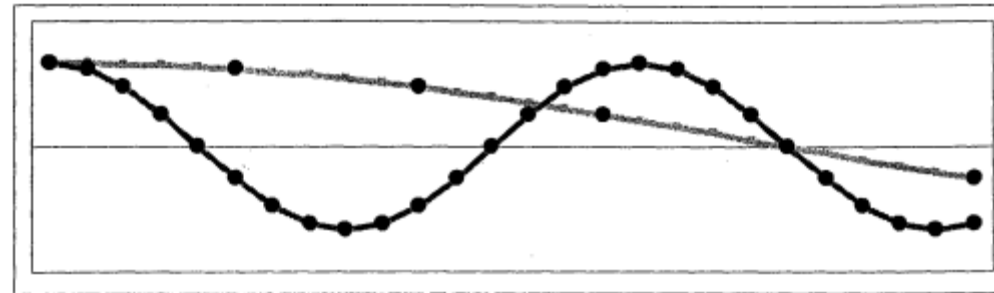
➤ Örnekleme işlemi zaman uzayında yapılırsa da, frekans uzayındaki değişimler dikkate alınmalıdır.

SAYISAL HABERLEŞME

3. 2. Örnekleme



Şekil 3.1. Örnekleme işlemi (a) Analog işaret (b) Örneklenmiş ayrık-zamanlı işaret.

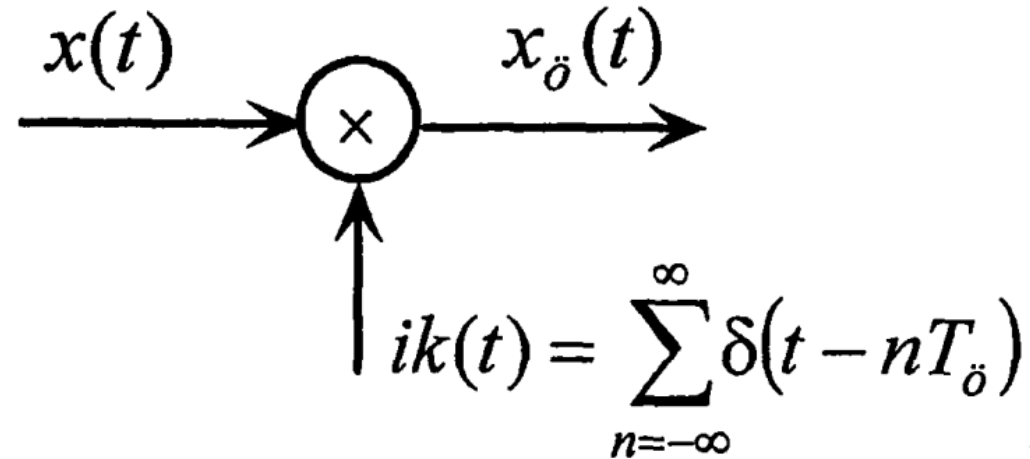


Şekil 3.2. Yavaş ve hızlı değişen işaretler için örnekleme sıklığı.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.1. İdeal Dürtü Örneklemesi

- İdeal şartlarda örneklemenin anlık olarak gerçekleştirilmesi ve analog işareten alınan örnek değerlerinin sadece örnekleme anında tanımlı olması istenmektedir.
- Bu durumda, sadece **örnekleme anlarında tanımlı** olan örnek değerleri, örnekleme anlarındaki **analog işaret değerlerine** eşit olmaktadır.
- Bu işlem matematiksel olarak, Şekil 3.3'de gösterildiği gibi analog $x(t)$ işaretinin örnekleme zaman anlarında tanımlanmış bir **dürtü katarı (impuls katarı)** ile çarpımı şeklinde ifade edilebilmektedir.
- Dürtü katarı, **örnekleme zaman anlarında tanımlanmış** dürtüler şeklinde oluşmakta
- İdeal dürtü örnekleme işleminin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.



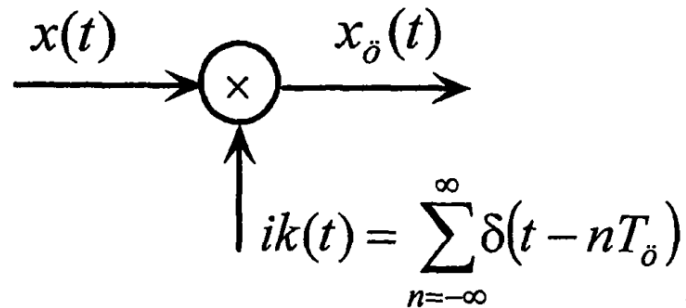
SAYISAL HABERLEŞME

3.2.1. İdeal Dürtü Örneklemesi

➤ Dürtü Katarı:

$$ik(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_{\delta})$$

- Burada;
 - $\delta(t)$: Birim dürtü işareti
 - T_{δ} : Örneklemeye Periyodu



SAYISAL HABERLEŞME

3.2.1. İdeal Dürtü Örneklemesi

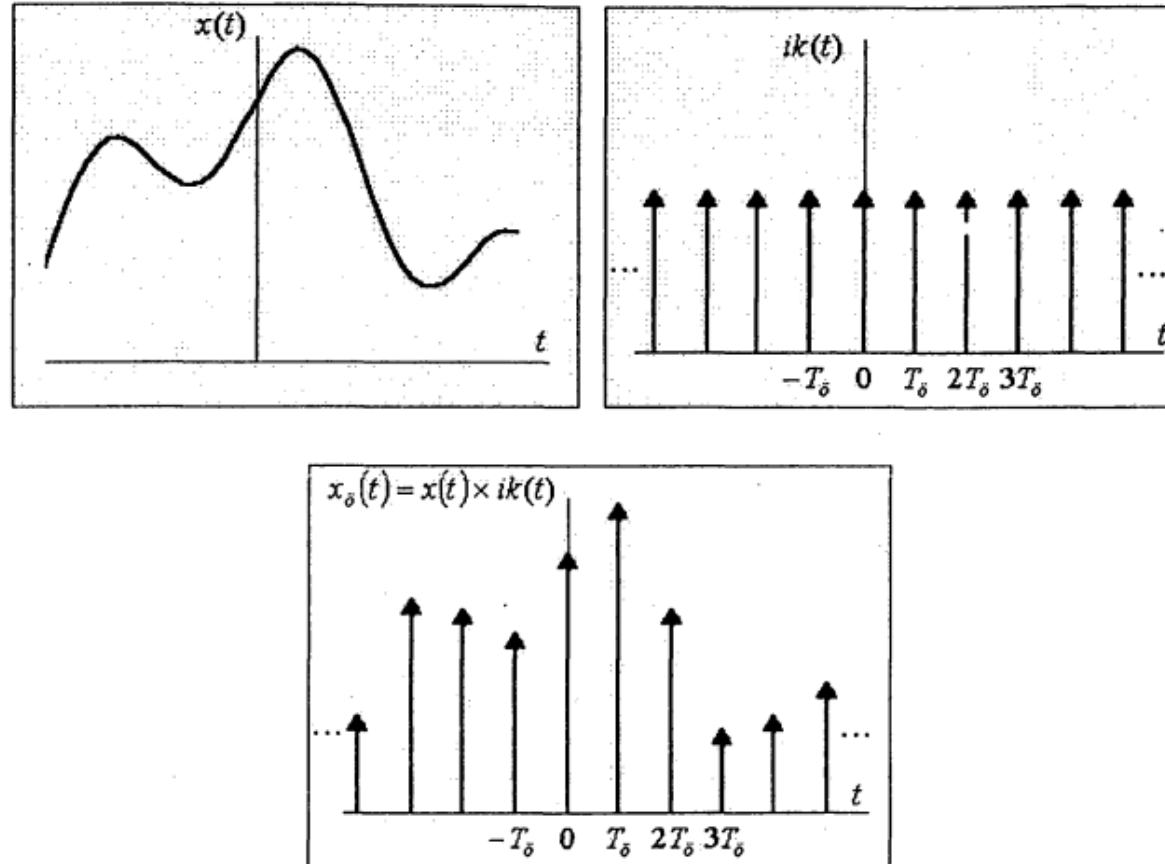
- İdeal dürtü örneklenmiş işaret $x_{\ddot{o}}(t)$: analog $x(t)$ işareti ile dürtü katarının çarpımına eşittir

$$x_{\ddot{o}}(t) = x(t) \times ik(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t)\delta(t - nT_{\ddot{o}}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_{\ddot{o}})\delta(t - nT_{\ddot{o}})$$

- Burada;
 - $nT_{\ddot{o}}$: Örneklemeye anları.
 - $\delta(t - nT_{\ddot{o}})$: Örneklemeye anlarında tanımlı dürtü işaretleri.
 - $x(nT_{\ddot{o}})$: Örneklemeye anlarında analog işaretin aldığı değer.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.1. İdeal Dürtü Örneklemesi

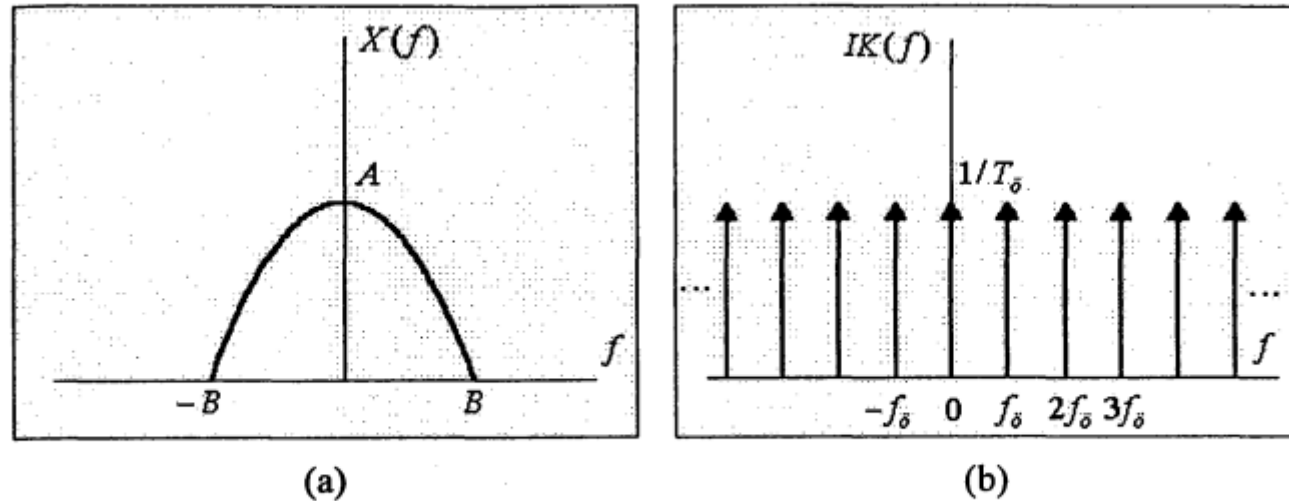


Şekil 3.4. Örnek bir analog işaret için ideal dürtü örnekleme.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.1. İdeal Dürtü Örneklemesi

- İdeal dürtü örneklenmiş işaret, zaman uzayında analog giriş işareti ile dürtü katarının çarpımı şeklinde oluşmaktadır.
- Zaman uzayında iki işaretin çarpımı, frekans uzayına işaret spektrumlarının konvolüsyonu şeklinde yansımaktadır.
- *İdeal dürtü örneklenmiş işaretin frekans spektrumu*, *analog işaretin frekans spektrumu* ile *dürtü katarının frekans spektrumunun konvolüsyonu* şeklinde oluşmaktadır.
- Şekil 3.5(a)'da B Hz frekansına **bant-sınırlı bir tabanbant işareti** için örnek bir frekans spektrumu gösterilmektedir.



Şekil 3.5. (a) Bant-sınırlı tabanbant işareti spektrumu (b) İdeal dürtü katarı spektrumu.

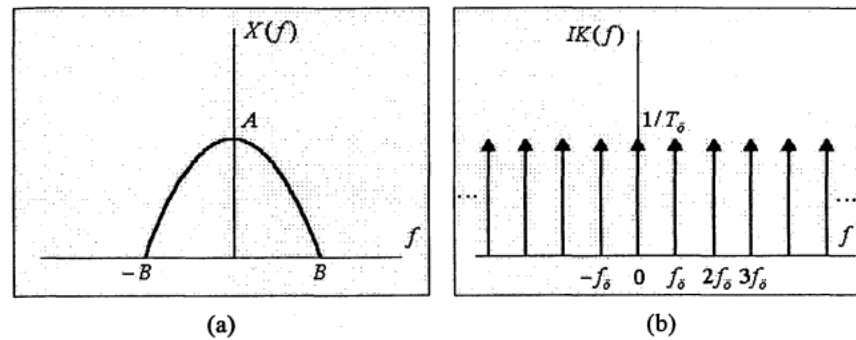
SAYISAL HABERLEŞME

3.2.1. İdeal Dürtü Örneklemesi

- Dürtü katarının frekans spektrumunun elde edilebilmesi için periyodik işaretlerin Fourier dönüşümü özelliği kullanılarak, periyodik dürtü katarının Fourier seri katsayıları hesaplanabilmektedir.
- Bu işlem sonucunda dürtü katarının frekans spektrumu şu şekilde ifade edilmektedir

$$IK(f) = \frac{1}{T_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_0)$$

- Dürtü katarının frekans spektrumu Şekil 3.5(b)'de gösterildiği gibi **örnekleme frekansının tamsayı katlarında tanımlanmış** bir dürtü katarı şeklinde oluşmaktadır.



Şekil 3.5. (a) Bant-sınırlı tabanbant işareti spektrumu (b) İdeal dürtü katarı spektrumu.

SAYISAL HABERLEŞME

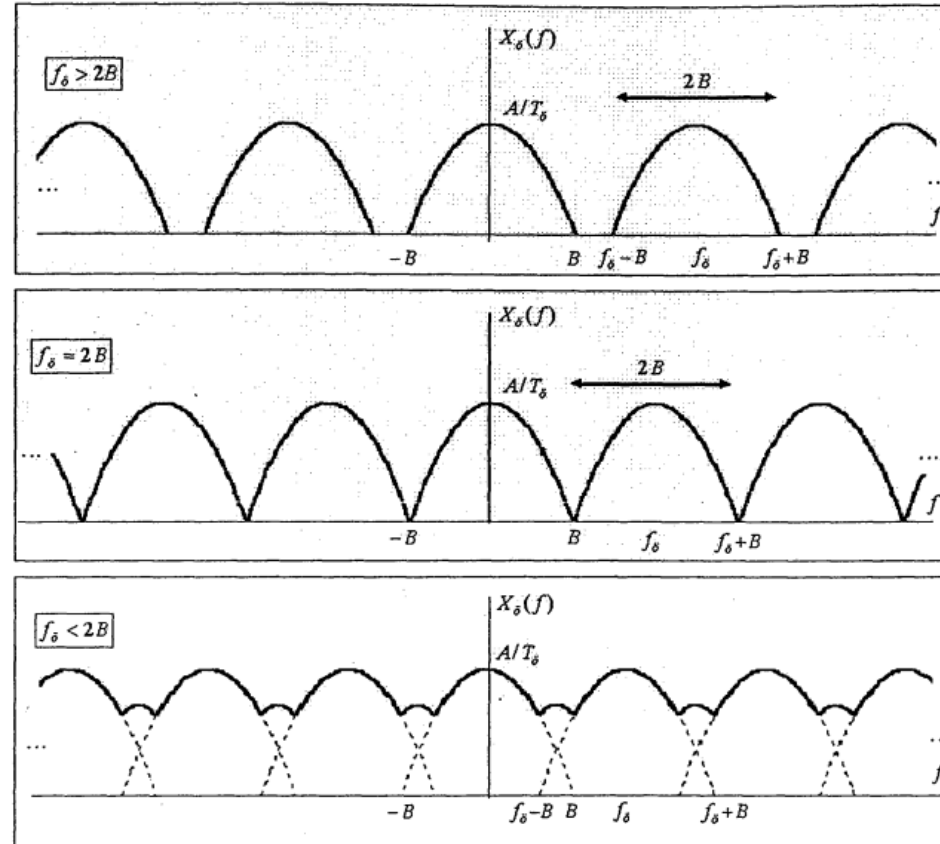
3.2.1. İdeal Dürtü Örneklemesi

- İdeal dürtü örneklenmiş işaretin frekans spektrumu, analog işaretin frekans spektrumu ile dürtü katarının frekans spektrumunun konvolüsyonu şeklinde bulunabilmektedir.
- Bu nedenle ideal dürtü örneklenmiş işaretin frekans spektrumu şu şekilde ifade edilir.

$$X_{\ddot{o}}(f) = X(f) * IK(F) = X(f) * \left[\frac{1}{T_{\ddot{o}}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_{\ddot{o}}) \right] = \frac{1}{T_{\ddot{o}}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_{\ddot{o}})$$

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.1. İdeal Dürtü Örneklemesi



Şekil 3.6. Farklı örnekleme frekans aralıkları ($f_\delta < 2B$, $f_\delta = 2B$, $f_\delta > 2B$) için bant-sınırlı bir işaretin ideal dürtü örnekleme sonucu oluşan frekans spektrumları.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.1. İdeal Dürtü Örneklemesi

- Örneklem frekansı tam olarak analog tabanbant işaretinin bant genişliğinin iki katına eşit olduğunda (f_0) ideal dürtü örneklenmiş işaretin spektrumunda tekrar eden frekans bileşenleri bitişik olmaktadır.
- Bu durumda tekrar eden frekans bileşenleri arasında bir boşluk meydana gelmemektedir.
- Frekans spektrumunda bir çakışma olmadığından işaretle bilgi kaybı meydana gelmemektedir.
- Örneklem frekansının ($f_0 = 2B$) oranı, ideal dürtü örneklenmiş işaretin frekans spektrumunda çakışma yaratmayan en düşük örneklem frekansını vermektedir.
- Analog tabanbant işaretinin bant genişliğinin iki katına eşit bu örneklem frekansı **Nyquist oranı** olarak nitelendirilmektedir.
- Örneklem frekansının analog işaretin maksimum frekans değerinin iki katına eşit veya büyük olması şartına **Nyquist kriteri** denmektedir. Bu kriter doğrultusunda analog bir işaret örnekleneyeceği zaman, bant genişliği B Hz olan bir tabanbant işareti için örneklem frekansı $f_0 \geq 2B$ şartını sağlayacak şekilde belirlenmelidir.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.1. İdeal Dürtü Örneklemesi

➤ Nyquist Kriterine Göre Yeniden Oluşturma

➤ Geriçatma (Yeniden Oluşturma) Filtresi

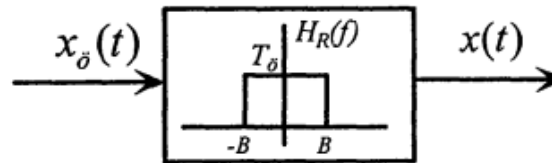
- Nyquist kriterine uygun örneklenmiş bir işaret, alçak-geçiren filtre kullanılarak yeniden analog hale getirilebilir.
- Bu filtre geriçatma filtresi veya yeniden oluşturma filtresi olarak adlandırılır.

➤ Alçak-Geçiren Filtrenin Rolü

- Filtre, tabanbanttaki temel frekans bileşenlerini geçirerek analog işareti yeniden oluşturur.
- Çıkış işareti, giriş işaretinin frekans spektrumu ile filtrenin frekans yanıtının çarpımı olarak oluşur.

➤ İdeal Yeniden Oluşturma Koşulları

- Filtrenin geçirme bandı, analog işaretin bant genişliğine eşit olmalıdır.
- Kazanç değeri örnekleme periyodu (T_0) olarak alınırsa, ideal dürtü örneklenmiş işareten tam olarak analog işaret elde edilebilir.

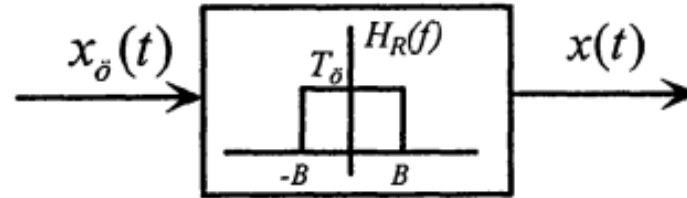


Şekil 3.7. Analog işaretin örneklenmiş işareten yeniden oluşturulması.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.1. İdeal Dürtü Örneklemesi

- Uygulamada her zaman örneklenmeden önce analog işaret alçak-geçiren bir örtüşme-önler filtreden geçirilerek bant-sınırlı hale getirilmektedir.
- Pratik filtrelerin geçiş bandı etkisi nedeniyle uygulamada Nyquist kriterinden daha büyük bir örnekleme frekansı kullanılmakta ve örnekleme işlemi çoğunlukla örnekle-ve-tut yöntemi ile gerçekleştirilmektedir.

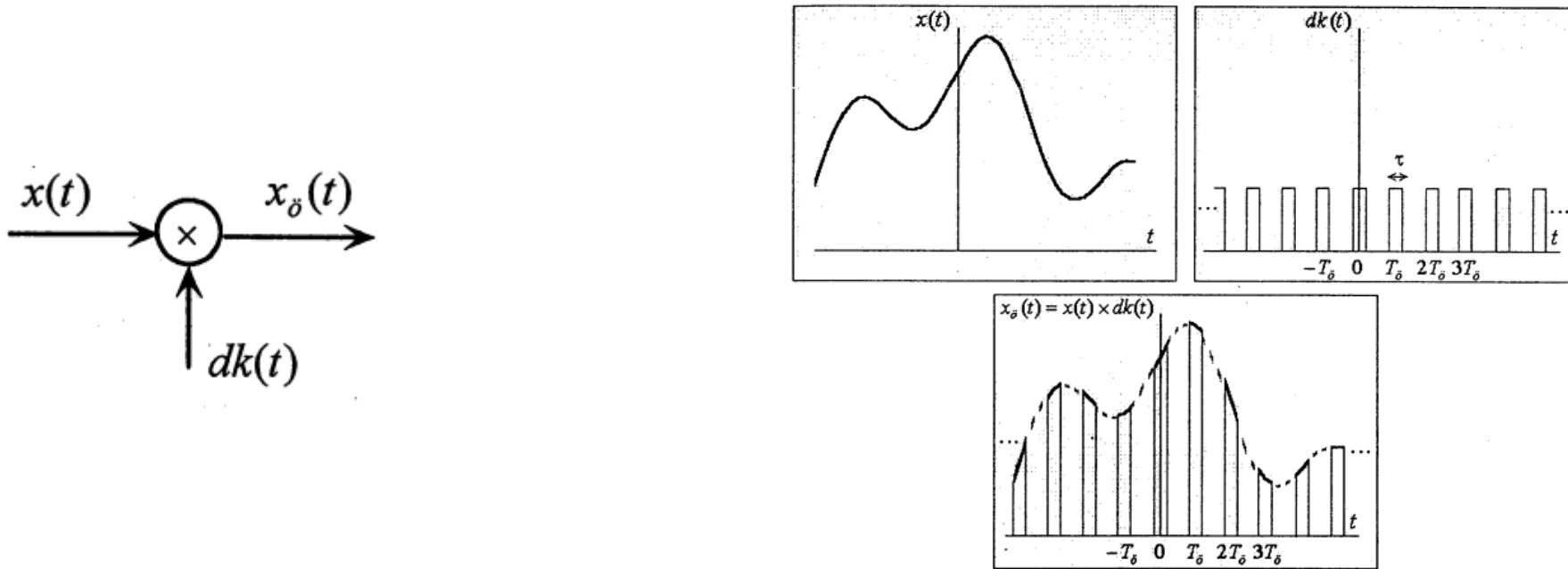


Şekil 3.7. Analog işaretin örneklenmiş işareten yeniden oluşturulması.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.2. Doğal Örnekleme

- Doğal örneklemenin matematiksel ifadesi analog işaretin bir darbe katarı ile çarpımı şeklinde ifade edilir.
- $$x_{\delta}(t) = x(t) \times dk(t)$$



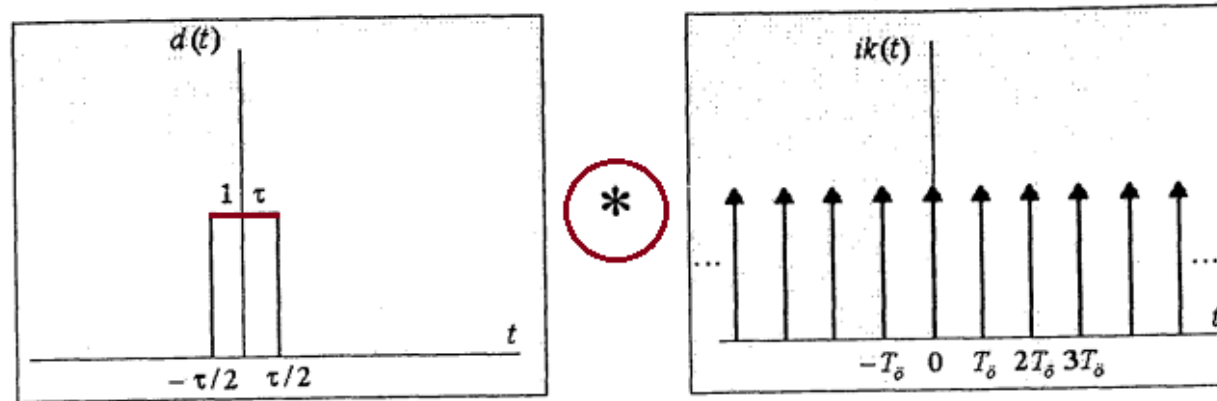
Şekil 3.12. Örnek bir analog işaret için doğal örnekleme.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.2. Doğal Örnekleme

- *Doğal örneklenmiş işaret*, zaman uzayında *analog işaret* ile *darbe katarının çarpımı* şeklinde gösterilebilmektedir.
- Bu nedenle doğal örneklenmiş işaretin *frekans spektrumu*, *analog işaretin frekans spektrumu* ile *darbe katarının frekans spektrumunun konvolüsyonu* olarak bulunmaktadır.
- Dolayısıyla doğal örneklenmiş işaretin frekans spektrumunun matematiksel ifadesinin elde edilebilmesi için öncelikle *darbe katarının frekans spektrumunun* bulunması gerekmektedir.
- Darbe katarının frekans spektrumunun matematiksel ifadesinin elde edilebilmesi için darbe katarı, Şekil 3.13'de gösterildiği gibi tek bir darbe $d(t)$ ile bir dürtü katarı $ik(t)$ nin konvolüsyonu olarak şu şekilde gösterilir.

$$dk(t) = d(t) * ik(t)$$



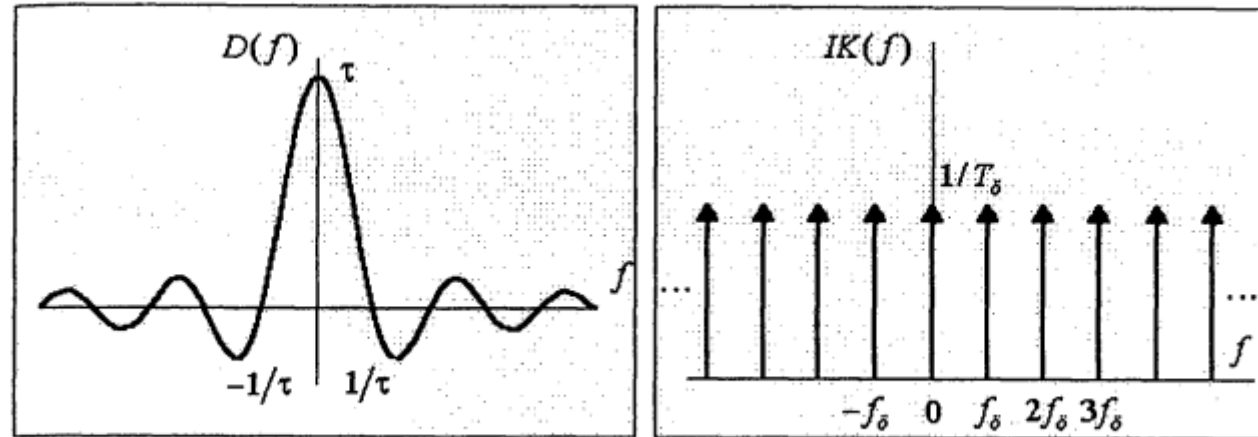
Şekil 3.13. Darbe katarının matematiksel olarak tek bir darbe ile dürtü katarının konvolüsyonu şeklinde ifade edilmesi.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.2. Doğal Örnekleme

- Zaman uzayında darbe katarı, tek bir darbe ile dürtü katarının konvolüsyonu şeklinde modellenebilmektedir,
- Bu nedenle frekans uzayında **darbe katarının frekans spektrumu** **darbenin frekans spektrumu** ile **dürtü katarının frekans spektrumunun** çarpımı olarak ifade edilir.

$$DK(f) = D(f) \times IK(f)$$



Şekil 3.14. Bir darbenin ve dürtü katarının frekans spektrumları.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.3. Örnekle ve Tut (Düz Tepeli Örnekleme)

➤ Tanım:

- Örnekle-ve-tut, pratikte en çok tercih edilen örnekleme yöntemidir. Bu yöntemde, her örnekleme süresi boyunca sabit bir değer alınır ve korunur.

➤ Örnekleme Süreci:

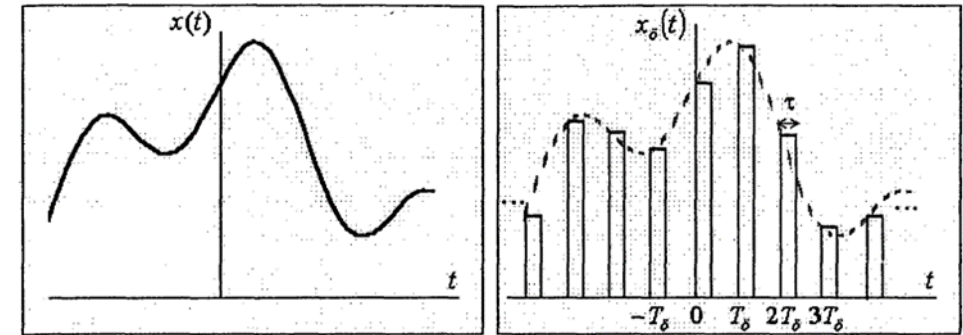
- Örnekleme başladığında analog işaretin anlık değeri alınır ve örnekleme süresi boyunca sabit tutulur.
- Bu nedenle, düz-tepeli örnekleme olarak da adlandırılır.

➤ Matematiksel Model:

- İdeal dürtü örnekleme ile benzerlik gösterir; ancak burada alınan değerler belirli bir süre boyunca sabit kalır.
- Matematiksel olarak, örneklenmiş işaretin bir darbe ile konvolüsyonu olarak ifade edilebilir.

$$x_{\text{ö-t}}(t) = d'(t) * x_i(t)$$

$$x_{\text{ö-t}}(t) = d'(t) * [x(t) \times ik(t)]$$



Şekil 3.17. Analog bir işaret için örnekle-ve-tut işlemi.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.3. Örnekle ve Tut (Düz Tepeli Örnekleme)

➤ Frekans Spektrumuna Etkisi:

- Örneklenmiş işaretin spektrumunu analiz etmek için, analog işaret ile ilişkilendirilmesi gerekir.
- Örnekleme işlemi sırasında tutulan işaret değerleri, örnekleme başlangıcındaki işaret değerleriyle eşleşir.
- Zaman uzayında iki işaretin konvolüsyonu sonucunda oluşan işaretin frekans spektrumu, bu iki işaretin frekans spektrumlarının çarpımı olarak bulunmaktadır.
- Bu nedenle örnekle-ve-tut işaretinin frekans spektrumu ifadesi şu şekilde ifade edilir.

$$X_{\text{ö-t}}(f) = D'(f) * X_{i-d}(f)$$
$$X_{\text{ö-t}}(f) = D'(f) * [X(f) \times IK(f)]$$

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.3. Örnekle ve Tut (Düz Tepeli Örnekleme)

➤ Örnekle-ve-Tut İşaretinin Frekans Spektrumu

- **Frekans Spektrumu ve Darbe Fonksiyonu:**
 - Örnekle-ve-tut işleminin frekans spektrumu, darbe fonksiyonunun spektrumu ile ideal dürtü örneklenmiş işaretin spektrumunun çarpımıdır.
 - Darbenin genlik spektrumu $D(f) = \tau \text{sinc}(f\tau)$ şeklinde ifade edilir.
- **Zamanda Öteleme Etkisi:**
 - Örnekle-ve-tut işleminde kullanılan darbe, 1/2 soranında ötelenmiş bir biçimdedir.
 - Zaman uzayında öteleme, spektrumun genliğini değiştirmez, sadece fazında doğrusal bir kaymaya neden olur.
- **Bant Genişliği ve Nyquist Kriteri:**
 - Örnekleme frekansı, Nyquist kriterine uygun olmalı, yani işaretin bant genişliğinin en az iki katı olmalıdır ($f \geq 2B$).
 - Örnekleme darbesinin süresi τ , örnekleme periyodundan küçük veya eşit olmalıdır ($\tau \leq T$).
 - Daha uzun örnekleme süresi → Daha dar bant genişliği
 - Daha kısa örnekleme süresi → Daha geniş bant genişliği

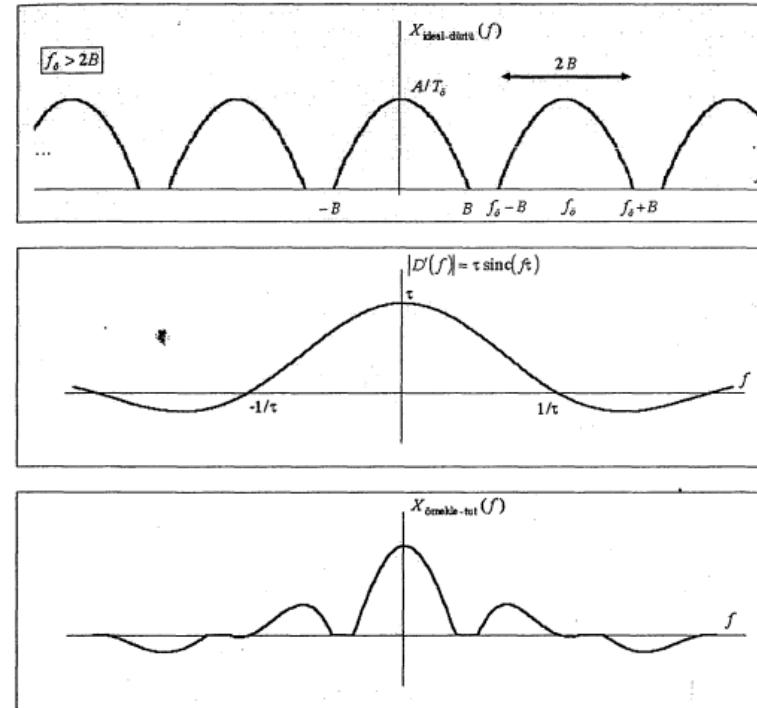
SAYISAL HABERLEŞME

3.2.3. Örnekle ve Tut (Düz Tepeli Örnekleme)

➤ Örnekle-ve-Tut İşaretinin Frekans Spektrumu

■ Bant Sınırlı İşaret Özelliği:

- Artan frekansta genlik azalır, bu nedenle örnekle-ve-tut işareti bant sınırlı bir işaret olarak kabul edilir.
- Örnekle-ve-tut işaretinin bant genişliği, darbenin spektrumundan belirlenir ve en düşük bant genişliği, örnekleme süresi T ile eşitlendiğinde elde edilir.

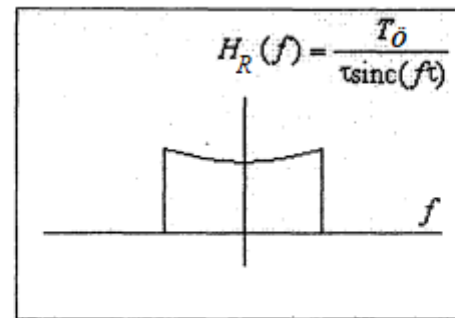


Şekil 3.19. Örnekle-ve-tut işaretinin frekans spektrumu.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.3. Örnekle ve Tut (Düz Tepeli Örnekleme)

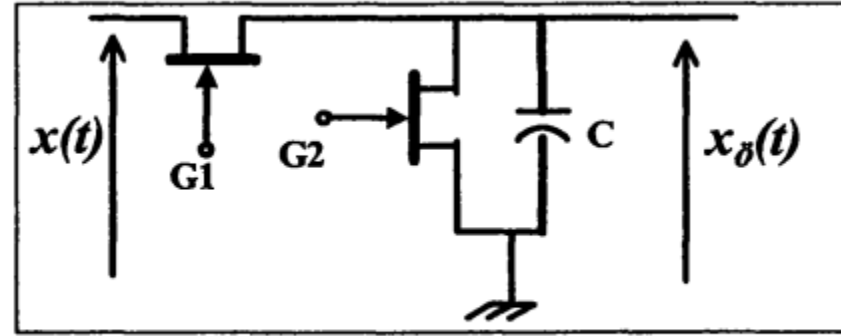
- İdeal-dürtü örnekleme durumunda, örnekleme aşamasında işaretin merkez spektrum bileşenlerinde bir bozulma meydana gelmediğinden doğrudan bir **alçak-geçiren geriçatma filtresi** kullanılarak analog bilgi işareti geri elde edilebilmektedir.
- **Örnekle-ve-tut işleminde** ise ideal-dürtü örneklemeyle elde edilmiş işaretin frekans spektrumu $\tau \text{sinc}(f_\tau)$ ile çarpıldığı için merkez frekans bileşenlerinde bir bozulma meydana gelmektedir.
- Bu etkinin yeniden-oluşturma sırasında düzeltilebilmesi için, yeniden-oluşturma filtresinin $1/\tau \text{sinc}(f_\tau)$ şeklinde bir kazancı olmalıdır.
- Şekil 3.20'de gösterildiği gibi kazancı $1/\tau \text{sinc}(f_\tau)$ ile orantılı bir **alçak-geçiren filtre** kullanılarak örnekle-ve-tut işaretinden analog bilgi işareti geri elde edilebilmektedir.



Şekil 3.20. Örnekle-ve-tut işlemi için yeniden-oluşturma süzgecinin frekans yanıtı.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.3. Örnekle ve Tut (Düz Tepeli Örnekleme)



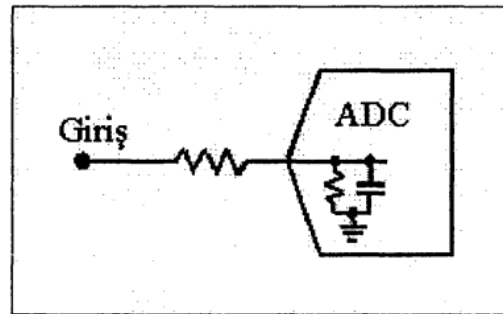
Şekil 3.21. Basit bir örnekle-ve-tut devresi.

- G1 ucuna uygulanan bir darbe ile kapatılan *örnekleme anahtarı* (FET) sayesinde kapasitör giriş işaretinin seviyesine kadar dolmakta ve *kapasitör üzerinde tutulan değer* ile *örnekleme* işlemi gerçekleştirilmektedir.
- Örnekleme değerlerini tutan kapasitör, *tutma kapasitörü* olarak adlandırılmaktadır.
- Örnekleme değeri, G2 ucuna uygulanan bir darbe ile *boşaltma anahtarı (FET)* tarafından boşaltılıncaya kadar kapasitör tarafından tutulmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.3. Örnekle ve Tut (Düz Tepeli Örnekleme)

- Örnekleme sistemine, *yani analog/sayısal çeviriciye*, yüksek empedanslı bir giriş uygulandığında mutlaka bir giriş tamponunun kullanılması gerekmektedir.
- Şekil 3.22'de görüldüğü gibi giriş empedansı, ADC'nin örnekleme kısmının empedansı ile beraber gerilim bölücü olarak hareket etmekte.
- Bu nedenle girişe uygulanan gerilim seviyesinin tamamı ADC'nin tutma kapasitöründe gözükmemektedir.
- Bu olay *kazanç hatası* olarak adlandırılmaktadır.
- *Yatışma süresi hatası* olarak adlandırılan ikinci bir etki olarak, oluşan RC zaman sabiti nedeniyle yatışma süresi artmakta ve bu nedenle kapasitörün örnekleme anında hızlı bir şekilde örnekleme seviyesine gelmesi gecikmektedir.
- Üçüncü bir etki ise kapasitör davranışının, *RC devresinin alçak-geçiren filtre* gibi davranması sonucunda uygulanan gerilime göre değişim göstermesi olarak tanımlanan *bozunum* etkisidir.
- Bu üç etkiden dolayı ADC'nin birinci basamağını oluşturan örnekle-ve-tut devresi için çoğunlukla bir giriş tamponu kullanılmaktadır.



Şekil 3.22. Analog/sayısal çeviriciye (ADC) bir giriş işaretinin uygulanması.

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.4. Bant Geçiren İşaretlerin Örneklemesi

➤ Nyquist Kriteri ve Örnekleme Frekansı:

- Bant-geçiren işaretler Nyquist kriterine göre en yüksek frekansın iki katına eşit veya büyük bir frekansta örneklenmelidir.
- Ancak bu yöntem, çok yüksek örnekleme frekansları gerektirebilir.
- Bant-geçiren işaretler, dar bir frekans bandında tanımlandığından, daha düşük frekanslarda da örneklenebilir.

➤ Örnekleme Frekansının Belirlenmesi:

- Örnekleme frekansının herhangi bir tamsayı katı, işaretin frekans bandına denk gelmemelidir.
- Aksi halde, frekans spektrumunda çakışmalar meydana gelir.
- Şart:
 - Örnekleme frekansının yarısının tamsayı katı da bant-geçiren işaretin spektrumu içerisine düşmemelidir.
 - Bu, frekans spektrumunun örnekleme frekansının yarısının tamsayı katları arasına yerleşmesi gerektiğini ifade eder.

➤ Örnekleme Frekansı ile İşaretin Frekansları Arasındaki İlişki:

- En yüksek frekans f_{max} , en düşük frekans f_{min} olmak üzere, (n bir tamsayıdır)

$$f_{max} \leq n \frac{f_{\ddot{o}}}{2} \quad \text{ve} \quad f_{min} \geq (n - 1) \frac{f_{\ddot{o}}}{2}$$

SAYISAL HABERLEŞME

3.2.4. Bant Geçiren İşaretlerin Örneklemesi

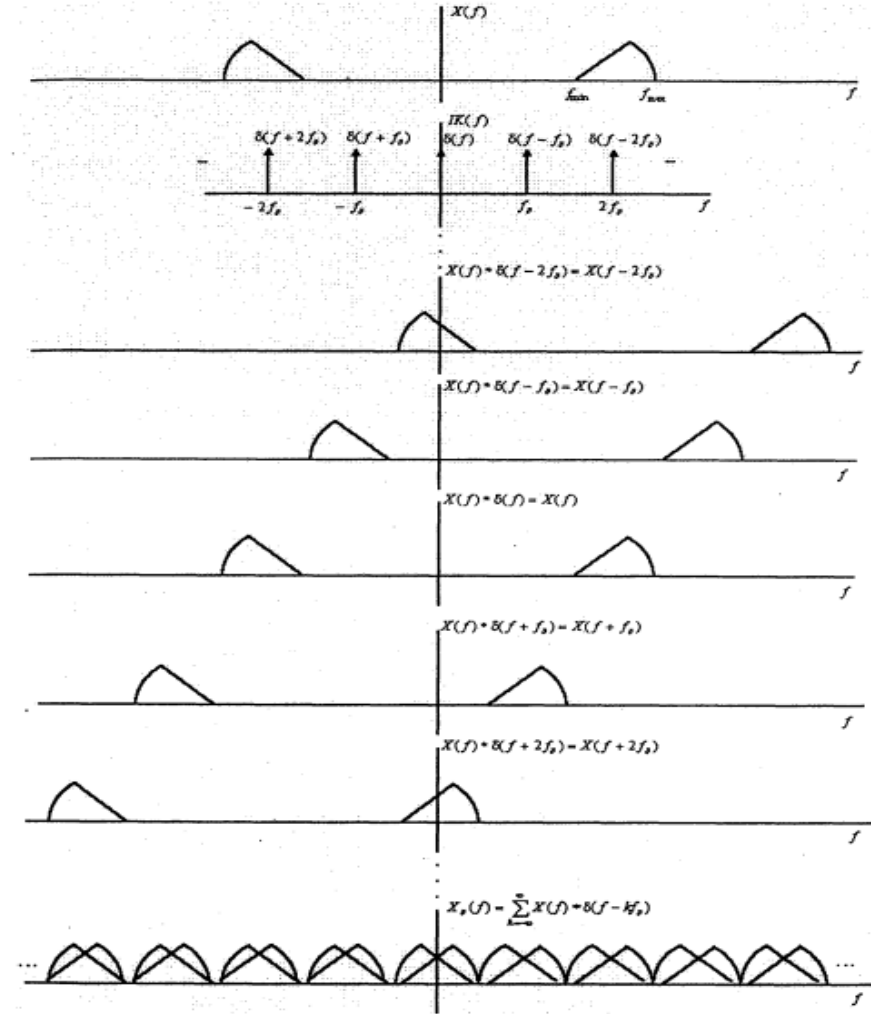
➤ *Sonuç:*

- Bant-geçiren işaretlerin örnekleme frekansı Nyquist kriterinden düşük olabilir, ancak çakışmayı önlemek için özel bir seçim yapılmalıdır.
- Frekans spektrumunun çakışmasını önlemek için örnekleme frekansı, işaretin bant genişliğine ve merkezi frekansına bağlı olarak özenle seçilmelidir.

SAYISAL HABERLEŞME»

3.2.4. Bant Geçiren İşaretlerin Örneklemesi

- Bant-geçiren bir işaretin frekans spektrumunun en yüksek frekansı max, en düşük frekansı da min ile gösterilebilmektedir.
- Şekil 3.24'te, örnekleme frekansının *herhangi bir tamsayı katı*, *bant-sınırlı işaretin* frekans bandı içerisine denk geldiği taktirde frekans spektrumun oluşumu gösterilmektedir.
- Bu durumda örneklenen işaretin frekans spektrumunda, bant-geçiren işaret spektrum bileşenlerinin örnekleme frekanslarında tekrar etmesi sonucunda mutlaka bir çakışma meydana gelmektedir.
- Bu nedenle *bant-geçiren bir işaretin örneklenmesindeki ilk kriter*, *örnekleme frekansının herhangi bir tamsayı katının* bant-geçiren işaretin *frekans spektrumu içerisine* denk gelmemesi şartı şeklinde oluşturulabilmektedir.

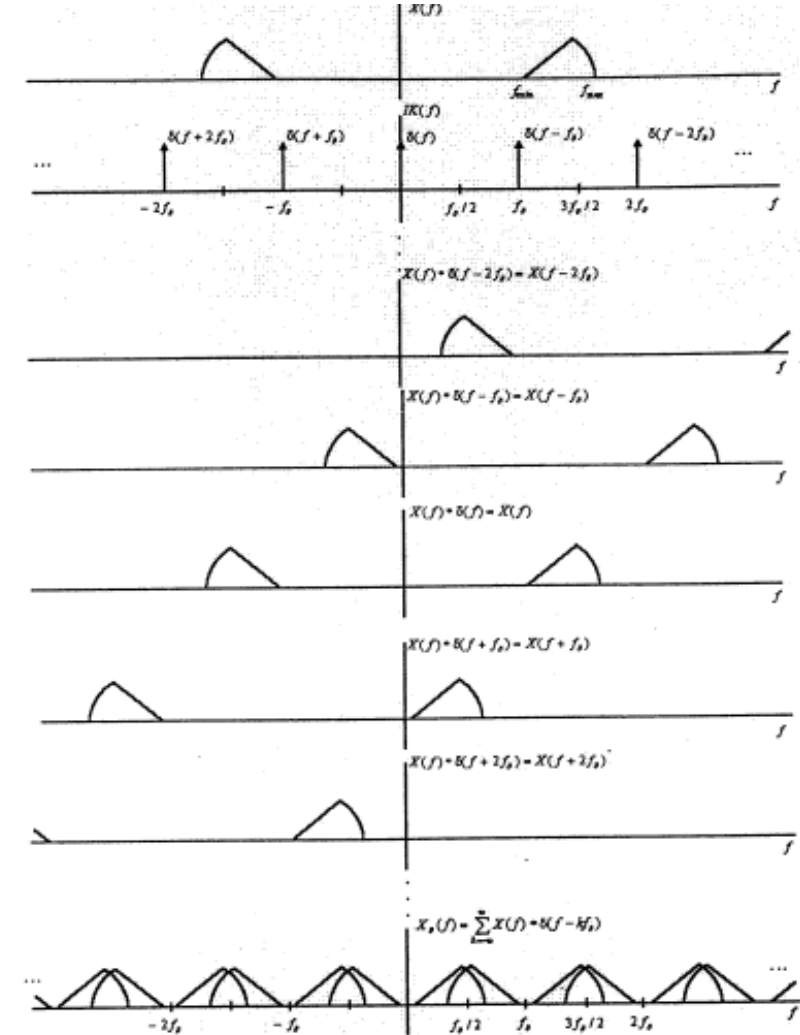


Şekil 3.24. Bant-geçiren bir işaretin, örnekleme frekansının herhangi bir tamsayı katı işaretin frekans spektrumu içerisine düşen bir örnekleme frekansı ile örneklenmesi.

SAYISAL HABERLEŞME»

3.2.4. Bant Geçiren İşaretlerin Örneklemesi

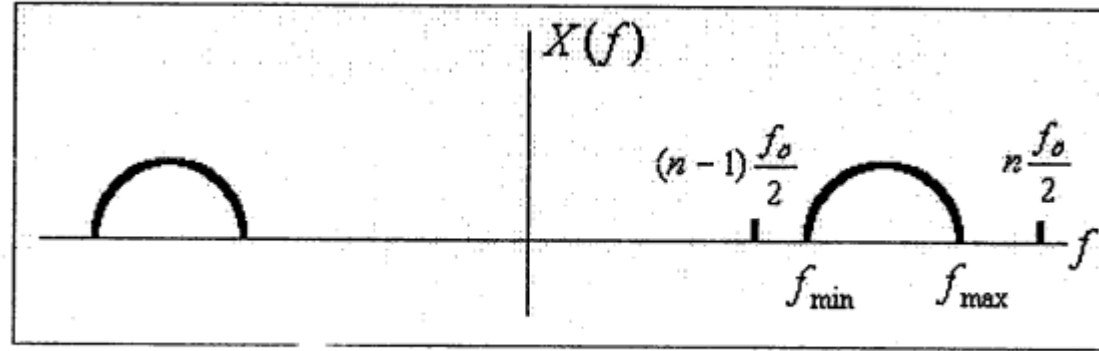
- *Örneklemeye frekansının yarısının tamsayı katı* bant-geçiren işaretin frekans spektrumu içerisine düşen bir örneklemeye frekansı kullanıldığında oluşan frekans spektrumu Şekil 3.25'de gösterilmektedir.
- Görüldüğü gibi bu durumda *örneklenmiş işaretin frekans spektrumunda*, örneklemeye frekansının yarısının tamsayı katları civarında çakışma meydana gelmektedir.
- Bu nedenle *bant-geçiren bir işaretin örneklenmesinde* *örneklemeye frekansının yarısının* herhangi bir tamsayı katının *bant-geçiren işaretin frekans spektrumu içerisine* denk gelmemesi gerektiği şartı oluşmaktadır.



Şekil 3.25. Bant-geçiren bir işaretin, örneklemeye frekansının yarısının herhangi bir tamsayı katı işaretin frekans bandına düşen bir örneklemeye frekansı ile örneklenmesi.

SAYISAL HABERLEŞME»

3.2.4. Bant Geçiren İşaretlerin Örneklemesi



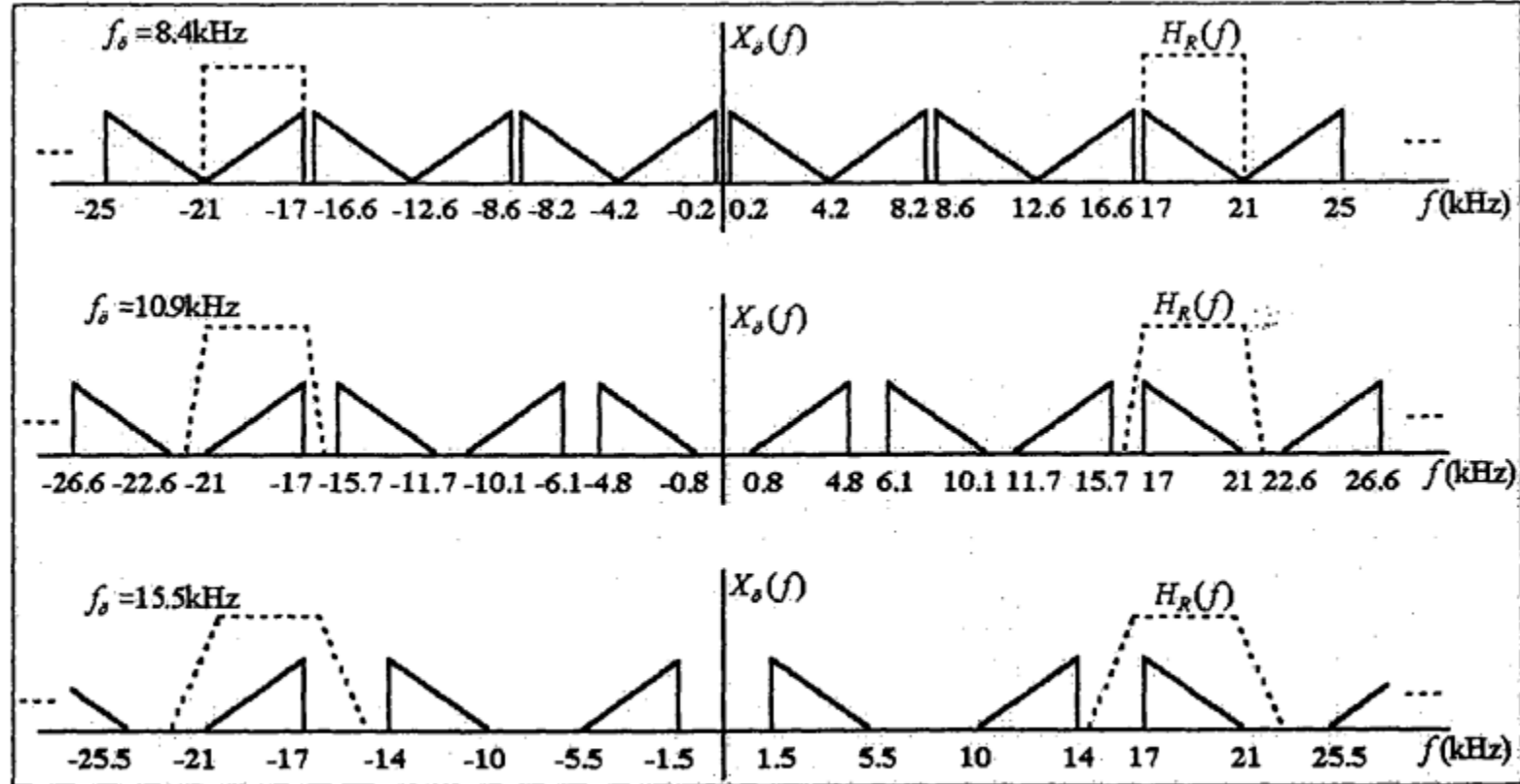
Şekil 3.26. Bant-sınırlı bir işaret için örnekleme frekansının belirlenmesi.

- Şekil 3.26'da gösterilen bu ilişki sağlandığında,
- **Örnekleme frekansının yarısının herhangi bir tamsayı katı** bant-geçiren işaretin frekans bandının içerisine denk gelmemektedir.
- Dolayısıyla örneklenmiş işaretin frekans spektrumunda bir çakışma meydana gelmesi önlenmektedir.
- Her iki kriter birleştirildiğinde, örneklenen bant-geçiren işaretin frekans spektrumunda bir çakışma meydana gelmemesi için örnekleme frekansının formüldeki aralıkta olması gerektiği bulunmaktadır.

$$\frac{2}{n} f_{max} \leq f_{\text{ö}} \leq \frac{2}{n-1} f_{min}$$

SAYISAL HABERLEŞME»

3.2.4. Bant Geçiren İşaretlerin Örneklemesi



Şekil 3.27. Örnek 3.3 için farklı örnekleme frekanslarında ideal dürtü örneklenmiş bant-geçiren işaretin frekans spektrumu.